

Tabellarischer Lebenslauf

Name: Jürgen Baumbusch

Geburtstag: 15. Mai 1965 in 74722 Buchen/Odw.

Familienstand: ledig

Schulbesuch: 1971 bis 1975, Grundschule in Buchen/Odw.
1975 bis 1976, Hauptschule in Buchen/Odw.
1976 bis 1985, Burghardt-Gymnasium in Buchen/Odw.
Abschluß: Abitur

Wehrdienst: 1985 bis 1986 Grundwehrdienst

Studium: WS 1986/87 bis SS 1990
Studium an der Fachhochschule Würzburg/Schweinfurt
Diplomarbeit im Fachgebiet Grundbau
Abschluß: Dipl.-Ing. (FH)
WS 1990/91 bis SS 1993
Universitäres Aufbaustudium an der Universität GH Kassel
Vertiefungsrichtung Grundbau und Bodenmechanik
Abschluß: Dipl.-Ing.

Berufs- und wissenschaftliche Tätigkeit: 1990 bis 1994
Freier Mitarbeiter und Angestellter eines geotechnischen Institutes
1994 bis 1997
Halbtagestätigkeit als Projektingenieur für Bodenmechanik, Grund- und Deponiebau im Ingenieurbüro
seit 1994
Halbtagestätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter im AG Geotechnik an der MFPA Weimar
1996 bis 1998
externer Doktorand an der Bauhaus-Universität Weimar
seit 1998
Halbtagestätigkeit als leitender Angestellter in der Industrie
seit 1996
Mitglied der Untergruppe 2 „Filtern, Dränen und Trennen“ des Arbeitskreises 5.1 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik

Inhalt

1	Einleitung.....	7
2	Geosynthetische Filterelemente im Bauwesen -Stand der Technik-.....	9
2.1	Grundlagen und Anwendungsbereiche.....	9
2.2	Produktformen.....	10
2.3	Filtern mit Geotextilien.....	15
2.3.1	Allgemeines.....	15
2.3.2	Funktionelle Anforderungen und textiltechnische Parameter.....	17
2.3.3	Verhalten während der Gebrauchsphase.....	20
2.3.4	Bemessungsansätze.....	26
2.4	Analyse von Schadensfällen.....	33
2.5	Defizite aktueller Betrachtungsweisen.....	39
3	Entwicklung eines modifizierten Modells zur Funktionsweise von Filtersystemen.....	40
3.1	Intimate Contact als Bemessungsvorgabe.....	40
3.2	Modell der Durchströmungswiderstände.....	41
3.2.1	Strukturbetrachtung.....	41
3.2.2	Systemverhalten.....	42
3.3	Kontaktverhältnisse in-situ und Abbildung im Modell.....	45
3.4	Praktisches Konstruktionsbeispiel.....	46
4	Experimentelle Untersuchung von Kontaktphänomenen.....	47
4.1	Konzeption und Geotextil-Boden-Systeme.....	47
4.2	Großversuche in der „Weimarer Zelle“.....	50
4.2.1	Versuchsanlage.....	50
4.2.2	Versuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt.....	54
4.2.2.1	Versuchsablauf.....	54
4.2.2.2	Ergebnisdarstellung.....	56
4.2.3	Versuche mit vollflächigem Kontakt nach dem Einbau.....	69
4.2.3.1	Versuchsablauf.....	69
4.2.3.2	Ergebnisdarstellung.....	69
4.3	Untersuchungen zum Einfluß des Benetzungswiderstandes.....	73
4.3.1	Versuchseinrichtung und Untersuchungsablauf.....	73
4.3.2	Untersuchungsergebnisse.....	74
4.4	Ausgrabung geosynthetischer Filtermaterialien.....	77
4.4.1	Beschreibung der Entnahmestellen.....	77
4.4.2	Überprüfung der Funktionsfähigkeit.....	81
5	Ergebnisanalyse und Folgerungen für die Praxis.....	87
5.1	Modell der Durchströmungswiderstände.....	87
5.1.1	Einfluß der Kontaktsituation auf die Funktionsweise.....	87
5.1.2	Wasserdurchlässigkeitsverhalten unterschiedlicher Geotextilien.....	101
5.2	Projektion auf Anwendungsfälle in-situ.....	108
5.3	Empfehlungen für Entwurf und Bemessung.....	113
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	119

Literatur

116

Bezeichnungen

126

1 EINLEITUNG

Kunststoffe übernehmen in nahezu allen Gebieten des Bauwesens sehr vielfältige Aufgaben und Funktionen. In der Geotechnik und dem Wasserbau werden Kunststoffe, bzw. aus Kunststoffen gefertigte Baustoffe, seit mehr als 30 Jahren eingesetzt (Zitscher (1963),

Roelofs (1963)). Mit der Anwendung einher geht die ständige Weiter- und Neuentwicklung von Produkten, die zu Beginn als Filtermatten und Folien in Bauwerken des Erd- und Wasserbaus eingebaut wurden. Die Weiter- und Neuentwicklung bezieht sich einerseits auf die zur Herstellung verwendeten Werkstoffe incl. deren Verarbeitung und andererseits auf die Erweiterung des Anwendungsspektrums von Kunststoffen in der Geotechnik, dem Wasser-, dem Deponie-, dem Straßenbau,, etc. Man spricht heute deshalb global von Geokunststoffen und verbindet damit die Funktionen Filtern, Drainieren, Trennen, Bewehren, Dichten, Schützen und Verpacken. Jede dieser Funktionen impliziert spezifische Anforderungen an Eigenschaften und Qualitäten des Elementes gegenüber physikalischen und chemischen Beanspruchungsfällen.

Mit Berücksichtigung des Erfahrungspotentials aus Entwicklung, praktischem Einsatz und wissenschaftlicher Untersuchung ist in der Funktion des Filterns mit Flächengebilden aus synthetischen Fasern der wohl entscheidende Schritt zur Entstehung von Geokunststoffprodukten zu sehen (Christopher et al. (1992)). Besonders in diesem Anwendungsfeld haben sich teils sehr unterschiedliche Betrachtungsweisen und Ansichten herausgebildet. Diese nimmt beispielsweise Mlynarek (1996) zum Anlaß, sich kritisch über die Schnittstelle zwischen Entwicklung und Forschung einerseits und der praktischen Anwendung andererseits zu äußern.

Ziel dieser Arbeit ist es, Vorgänge und Verhaltensweisen, die im Zusammenhang mit der Kontaktsituation zwischen mineralischen Basiserdstoffen und geosynthetischen Filterelementen stehen, erstmalig durch ein gezieltes wissenschaftliches Untersuchungsprogramm für definierte Randbedingungen zu dokumentieren und ihre praktische Relevanz zu bewerten.

Der in der Fachwelt unter dem Begriff des sogenannten „Intimate Contact“ -im geotechnischen Sinne „Vollflächiger Kontakt“- diskutierte Problemkreis möglicher unterschiedlicher Kontaktsituationen steht global für das Bestreben, vollflächigen Kontakt zwischen mineralischem Basiserdstoff und geosynthetischem Filterelement im Zuge des Einbaus und während der Betriebsphase zu gewährleisten. Der Ansatz des planmäßig vorhandenen vollflächigen Kontaktes ist in allen maßgebenden Regelwerken und Empfehlungen enthalten. Bedingt durch die Eigenschaften der auf verfahrenstechnischem Wege hergestellten geosynthetischen Filterelemente und der konstruktiven und technologischen Randbedingungen vor Ort kann dieser nicht immer problemlos umgesetzt werden.

Koerner et al. (1993) (s. a. [0], [0], [0]) berichten von Schadensfällen, deren Ursache sie direkt oder indirekt auf fehlenden „Intimate Contact“ nach dem Einbau und während der Betriebsphase zurückführen.

Über die theoretische Analyse und Modellierung des Systems Mineralischer Basiserdstoff + Geosynthetischer Filter + Sickerwasser und dessen immanente Eigenschaften werden experimentelle Untersuchungs- und Meßmethoden zur Erfassung spezifischer Funktionsweisen entwickelt. Diese erlauben eine wirklichkeitsnahe Simulation unterschiedlicher Kontaktsituationen unter Laborbedingungen. Die Durchführung ergänzender Untersuchungen gestattet die partielle Bewertung von Einflüssen auf das Systemverhalten hinsichtlich der Durchströmung mit Sickerwasser. Während bisherige Erkenntnisse zum Filtrationsverhalten großteils aus Untersuchungen resultieren, deren Methodik und Randbedingungen

aus Versuchen mit mineralischen Kornfiltern übertragen wurden, berücksichtigen die entwickelten Modelle und Methoden grundsätzliche Unterschiede zwischen Filtersystemen mit geosynthetischen Filterelementen und mineralischen Kornfiltern. Mit Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse werden Hinweise zur Planung, Bemessung und Herstellung von

Filtersystemen mit geosynthetischen Filterelementen unter Einbezug vorhandener Regelwerke abgeleitet.

2 GEOSYNTHETISCHE FILTERELEMENTE IM BAUWESEN -STAND DER TECHNIK-

2.1 GRUNDLAGEN UND ANWENDUNGSBEREICHE

Die Funktion des Filterns mit geosynthetischen Filterelementen steht vielfach im Zusammenhang mit der Lösung von Bauaufgaben in der Geotechnik und dem Wasserbau.

Das Filterelement hat hierbei die Aufgabe, ein Lockergestein (Basiserdstoff) im Bereich des Wasseraustrittes vor hydraulisch bedingten Verformungen (Umlagerung und/oder Transport von Bodenteilchen) durch das Sickerwasser und/oder Grundwasser zu schützen. Das aus dem Basiserdstoff austretende Wasser soll möglichst druckverlustfrei durch den Filter hindurch- / abgeleitet werden (eine sinngemäße Aufgabendefinition wird auch nach ASTM D 653-90 in [0] vorgenommen).

Der Prozeß der Filtration mit Geotextilien im bodenmechanischen Sinne ist nach den Vorgaben der E DIN ISO 10318 (07/92) wie folgt definiert: Das Zurückhalten von Boden oder anderen Partikeln, die hydraulischen Kräften ausgesetzt sind, während der Durchfluß von Flüssigkeiten ermöglicht wird.

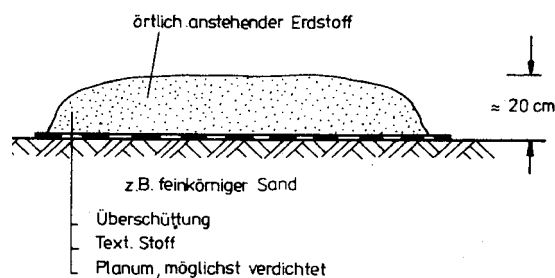


Bild a): Geosynthetisches Flächenfilter- und Trennelement [0]

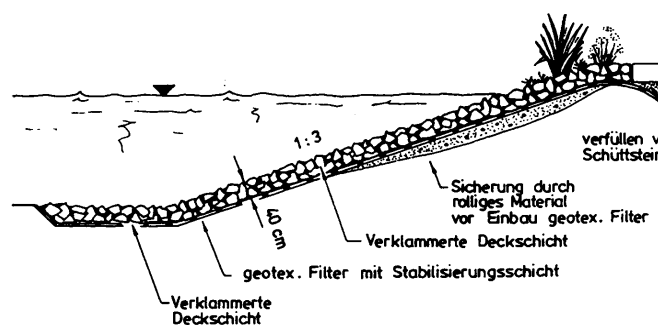


Bild c): Anwendung als Flächenfilter- und Erosionsschutzelement [0]

Abb. 2.1: Charakteristische Einsatzbereiche geosynthetischer Filterelemente

Sowohl die allgemeine Beschreibung der Aufgaben eines Filterelementes, als auch die gemäß internationaler Norm definierten Begriffe der Filtration und eines Filters geben die zentralen Anforderungen an ein Filterelement wieder. Es sind dies das sogenannte Boden-

Kenngröße/Eigenschaft	Polyacrylnitril (PAC)	Polyamid (PA) 6 / 6,6	Polyethylen (PE)	Polypropylen (PP)	Polyester (PES)
Raumgewicht [kN/m³]	11,80	11,40	9,50	9,10	13,80
Schmelzpunkt [°C]	250	212 / 256	125	165	260
Gebrauchstemperatur [°C]	65-75	80-120	70-80	100	100
Reißfestigkeit [N/mm²] [N/tex]	400-530 0,2-0,45	350-1000 0,3-0,9	300-650 0,3-0,7	220-550 0,25-0,6	350-1300 0,3-0,9
Naßreißfestigkeit	etwas niedriger als trocken	10 % niedriger bei 10 % höherer Dehnung	keine Änderung	keine Änderung	keine Änderung
Reißdehnung [%]	20-40	15-70	10-45	15-50	10-55
Kriechneigung bei Dauerbelastung	vorhanden	sehr gering	sehr stark	stark	sehr gering
UV-Beständigkeit	sehr gut	ausreichend	nicht ausreichend	schlecht	sehr gut
Verrottungsbeständigkeit	gut	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Beständigkeit gegenüber Bodenchemikalien	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
pH-Werte ohne besond. Eignungsnachweis	3 - 12	3 - 12	3 - 12	3 - 12	3 - 10

Tab. 2.1: Ausgewählte Parameter und Eigenschaften polymerer Rohstoffe; [0], [0], [0], [0]

rückhaltevermögen einerseits und die Gewährleistung ausreichender Wasserdurchlässigkeit andererseits. Beide Kriterien sichern die Funktionstüchtigkeit des Filterelementes während der Gebrauchsphase und werden mit den Begriffen Mechanische Filterwirksamkeit (Bodenrückhalte Kriterium) und Hydraulische Filterwirksamkeit (Wasserdurchlässigkeitskriterium) charakterisiert. Aus bodenmechanischer Sicht stehen beide Kriterien für zwei grundsätzlich entgegengerichtete Prozesse. Während die mechanische Filterwirksamkeit durch eine möglichst enge Struktur innerhalb des Filterelementes gewährleistet werden soll, impliziert die Forderung ausreichender Wasserdurchlässigkeit zur Sicherung der hydraulischen Filterwirksamkeit eine möglichst offenporige Struktur des Filters.

Die Modellierung aller maßgebenden Einflüsse und Randbedingungen ist, mit Grundlage der beschriebenen Aufgabe eines Filterelementes und der funktionsbezogenen Definition des Begriffes der Filtration, auf die Gewährleistung der mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit über die gesamte (funktionelle) Gebrauchsphase ausgerichtet. Sie bildet Einflüsse und Randbedingungen des Baugrundes, des Bauwerkes, der Filteraufgabe selbst und deren Interaktionen ab. An dieser Stelle als signifikant bezeichnete Modelle charakteristischer Einsatzbereiche geosynthetischer Filterelemente bestehen in der Anwendung als Flächenfilter, Grabenfilter und Rohrfilter. Diese sind für ausgewählte konstruktive Beispiele in Abb. 2.1 dargestellt.

2.2 PRODUKTFORMEN

Die Produktbezeichnung Geokunststoffe faßt eine Vielzahl von Erzeugnissen zusammen. In Abhängigkeit zur übertragenen Funktion im Bauwerk bzw. der Konstruktion unterscheiden sich physikalische und chemische Eigenschaften der Baustoffe teils maßgeblich.

Saathoff/Zitscher (1996) schlagen in [0] eine Begriffsdefinition für Geokunststoffprodukte vor. Sie bezeichnen Geokunststoffe als im Kontakt mit Böden und anderen Baustoffen im Bauwesen verwendete Flächengebilde (Rohre, Schächte und andere Elemente im Bauwesen, die ebenfalls aus Kunststoffen produziert werden, fallen nicht unter den Begriff

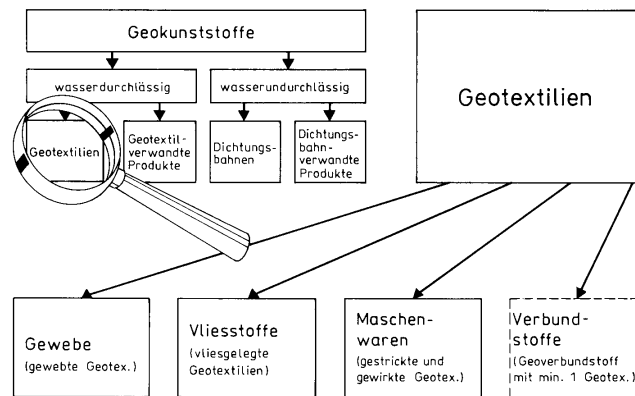


Abb. 2.2: Einteilung von Geokunststoffen und Geotextilien (Saathoff (1994) in [0])

„Geokunststoffe“). Für die Funktionen Filtern, Drainieren, Trennen, Bewehren, Schützen, Verpacken und Dichten empfehlen sie die systematische Einteilung von Geokunststoffen nach Abb. 2.2.

Gemäß E DIN ISO 10318 (07/92) [0] ist ein *Geotextil* ein durchlässiges polymeres Material, das gewebt, als Vliesstoff gelegt oder als Maschenware in geotechnischen oder bautechnischen Bereichen verwendet wird. Auch Produkte aus nicht rottebeständigen Rohstoffen, wie z. B. Kokosfasern oder Flachs, werden in [0] als Geotextilien bezeichnet, die gemäß Abb. 2.2 in Form von *Geweben*, *Vliesstoffen*, *Maschenwaren* und *Verbundstoffen* (*Geocompositen*) für die Funktionen Filtern, Drainieren, Trennen, Bewehren, Schützen und Verpacken verfügbar sind. In diesem Zusammenhang zu beachten ist, daß ein Geotextil in Abhängigkeit zum Anwendungsfall häufig mehrere Funktionen zugleich erfüllt (s. a. [0], [0], [0], [0]).

Für die Funktion des Filterns werden Geotextilien in Form von Geweben, Vliesstoffen, Maschenwaren und Verbundstoffen eingesetzt. Bevorzugt werden Vliesstoffe verwendet. Verbundstoffe kommen z. B. bei zusätzlicher Forderung einer Stabilisierungsschicht für Deckwerke im Wasserbau zum Einsatz. Weniger verbreitet sind Gewebe und Maschenwaren. Genaue Angaben zur Begriffsdefinition von Geweben, Vliesstoffen, Maschenwaren und Verbundstoffen sind in [0] und DIN 60000 (01/69) enthalten.

Die Gruppe der geotextilverwandten Produkte nach Abb. 2.2 -Geogitter, gitterähnliche Produkte etc.- ist nicht Gegenstand der vorgestellten Untersuchungen. Die Begriffsbestimmungen der American Society of Testing and Materials beschränken sich in ASTM D 4439-95 und D 4716-95 auf die Definition von Geokunststoffen, Geotextilien, Geweben und Geocompositen.

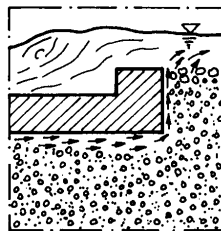
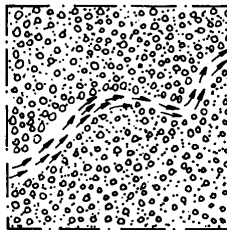
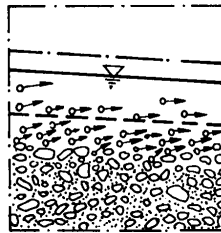
Die, neben anderen Quellen, in der Praxis angewandten Regelwerke und Empfehlungen zur hier behandelten Thematik des Filterns mit Geotextilien:

- | | | | |
|--------------------------------------|-----|---|-----|
| * BAW Merkblatt MAG (1993a), | [0] | * FGSV Merkblatt Nr. 535 (1994), | [0] |
| * DVWK Merkblatt Nr. 221 (1992), | [0] | * Schweizer Geotextilhandbuch (1988), | [0] |
| * DVWK Schriften Heft Nr. 76 (1989), | [0] | * Richtlinie Tiefenentwässerung (1988), | [0] |
| | | -in Überarbeitung- | |

enthalten weitere Hinweise und Angaben, auf die im Zusammenhang mit der Erläuterung von Begriffen und Definitionen jedoch verzichtet werden soll.

Polymere Rohstoffe

Zeit 1 Zeit 2



Zeit 1 Zeit 2

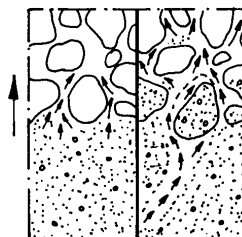
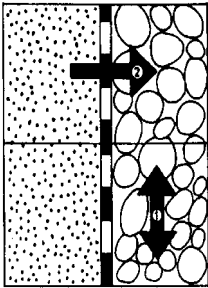
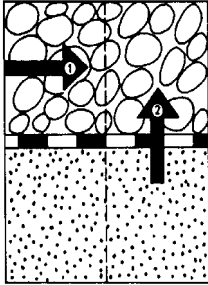
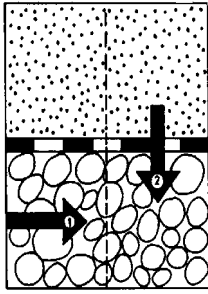


Bild a): Äußere
Erosion **Bild b):**
Innere Erosion **Bild**
c): Fugenerosion
Bild d):
Kontakterosion
mit rückschreitender
innerer Erosion

Abb. 2.4:
Schematische
Darstellung der
Erosion bei
nichtbindigen
Erdstoffen (Ziems
(1967))

Zeit 1 Zeit 2

Lastfall I
Lastfall II
Lastfall III



□

St
rö
m
un
gs
be
la
st
un
g
ta
ng
en
tia
l
zu
m
G
eo
te
xti
l

②

St
rö
m
un
gs
be
la
st
un
g
se
nk
re
ch
t
zu
m
G
eo
te
xti
l

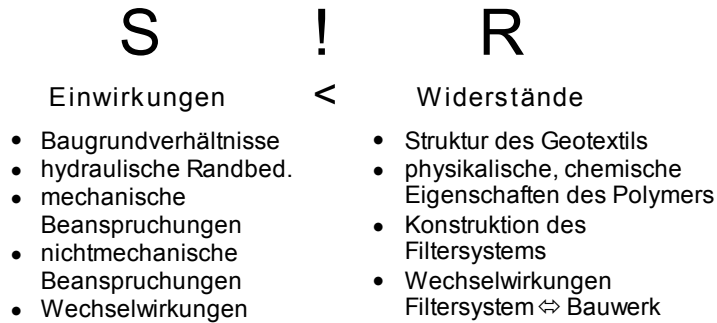


Abb. 2.7: Gegenüberstellung von Einwirkungen und Widerständen in Filtersystemen

Mit Berücksichtigung der an Geotextilien gerichteten Anforderungen einer Beständigkeit gegenüber physikalischen und chemischen Beanspruchungsfällen werden derzeit überwiegend folgende polymere Rohstoffe verwendet: Polyacrylnitril (PAC), Polyamid (PA), Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyester (PES) [0]. Nach Koerner (1994) wird der überwiegende Anteil von Geotextilien aus Polypropylen ($\approx 83\%$), gefolgt von Polyester ($\approx 14\%$), Polyethylen ($\approx 2\%$) und Polyamiden ($\approx 1\%$) gefertigt. Angaben zur Verwendung von Polyacryl macht Koerner nicht. Eine Übersicht über charakteristische Stoffparameter und das Verhalten der Materialien gegenüber typischen Einwirkungsgrößen bei Anwendung in Bauwerken der Geotechnik, dem Wasserbau etc. ist Tab. 2.1 zu entnehmen.

Auf spezielle Fragen der Langzeitbeständigkeit einzelner Polymere bzw. der daraus gefertigten Geotextilien soll, außer mit Hinweisen auf die einschlägige Literatur, nicht näher eingegangen werden: [0], [0], [0], [0], [0], [0], [0], [0], [0], [0] und andere.

Herstellungsverfahren und Produkte

Betrachtet man den gesamten verfahrenstechnischen Herstellungsprozeß von Geotextilien, sind für die späteren Eigenschaften der Produkte 3 wesentliche Einflußfaktoren zu nennen: Das verwendete Polymer, der aus dem Polymer hergestellte Grundwerkstoff und die textiltechnische Verfahrensweise zur Fertigung des Produktes. Geotextilien können aus Filamenten, Spinnfasern, hieraus hergestellten Garnen und Bändchen produziert werden (Saathoff (1988)). Im Zuge der Herstellung können sie eine textiltechnische Ausrüstung erhalten. Hierbei wird in einer Zusatzbehandlung z. B. das Verhalten gegenüber der Benetzung mit Flüssigkeiten beeinflusst. Zu den aus Polymeren hergestellten, hier als Grundwerkstoffe bezeichneten Fasern, Filamenten, Garnen ... etc., sind in der einschlägigen Literatur weitere Informationen enthalten [0], [0], [0], [0], [0], [0] und andere.

Möglichkeiten der Verfestigung und Bindung von Vliesstoffen, die neben Geweben, Maschenwaren und Verbundstoffen überwiegend für die Funktion des Filterns eingesetzt werden, sind Abb. 2.8 zu entnehmen.

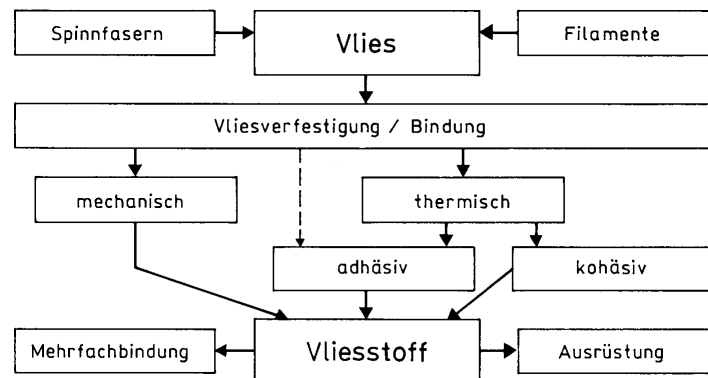


Abb. 2.8: Verfestigung und Bindung von Vliesstoffen (Saathoff (1988) in [0])

2.3 FILTERN MIT GEOTEXTILIEN

2.3.1 ALLGEMEINES

Der Prozeß der Filtration mit Geotextilien im bodenmechanischen Sinne steht nach den Vorgaben der E DIN ISO 10318 (07/92) für: Das Zurückhalten von Boden oder anderen Partikeln, die hydraulischen Kräften ausgesetzt sind, während der Durchfluß von Flüssigkeiten ermöglicht wird (Abschnitt 2.1).

Ursache der auf die Bodenpartikel einwirkenden hydraulischen Kräfte ist das sich im freien Porenvolumen des Bodens bewegendes Wasser. Die Beschreibung dieser Wasserbewegung erfolgt bei vollständiger Sättigung für laminare Strömungsverhältnisse unter Ansatz des Darcy'schen Gesetzes (Gl. 2.1). Auf die Spezifik von Wasserbewegungen in teilgesättigten mineralischen Medien soll nicht eingegangen werden.

$$v = k * i \quad [\text{m/s}] \quad \text{Gl. 2.1}$$

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad [-] \quad \text{Gl. 2.2}$$

$$v = \frac{Q}{A} = k * i \quad [\text{m/s}] \quad \text{Gl. 2.3}$$

Der hydraulische Gradient i (Gl. 2.2) quantifiziert das Potentialgefälle über die Durchströmungslänge Δl . Die Kontinuität der ein- und ausströmenden Wassermenge läßt eine Erweiterung der Beziehung von (Gl. 2.1) nach (Gl. 2.3) zu. Die von Darcy formulierten Abhängigkeiten sind Bestandteil des dynamischen Grundgesetzes der Geohydraulik -linearer Bereich-.

Allgemein bewirken Wasserbewegungen in den Porenkanälen eines mineralischen Kornhaufwerkes Reibungskräfte zwischen dem Sickerwasser und den Wänden der Porenkanäle, die bei entsprechender Größe und Struktur des Haufwerkes hydromechanische Verformungen einzelner oder aller Fraktionen des Erdstoffes auslösen können.

Bevorzugt treten hydromechanische Verformungen in **nicht-** bzw. **schwachbindigen Erdstoffen** mit $d_{10} > 0,002$ mm auf. Man unterscheidet örtliche und globale hydromechanische Verformungen eines Erdstoffes. Die Bezeichnung hydromechanisch gibt wieder, daß für das Auftreten dieser Vorgänge sowohl bestimmte hydraulische, als auch mechanische Kriterien/Randbedingungen erfüllt sein müssen. (Busch et al. [0])

Im Zusammenhang mit den Aufgaben von und den Anforderungen an Filter sind die örtlichen hydromechanischen Verformungen nichtbindiger Erdstoffe, besonders die Suffosion, die Erosion und die Kolmation relevant:

Suffosion

Unter dem Begriff der Suffosion ist die Umlagerung und der Transport feiner Fraktionen eines mineralischen Basiserdstoffes durch den vorhandenen Porenraum zu verstehen. Die Struktur des Erdstoffes bleibt erhalten. Man unterscheidet die innere, die äußere und die Kontaktsuffosion (Abb. 2.3).

Erosion

Erosionsvorgänge sind durch die Umlagerung und den Transport nahezu aller Fraktionen eines Basiserdstoffes an der freien Oberfläche oder im Inneren infolge frei fließenden Wassers oder durch Sickerwasser/Grundwasser gekennzeichnet. In Abhängigkeit zum Auftreten von Erosionsvorgängen unterscheidet man die äußere, die innere, die Fugen- und die Kontaktersion, deren Erscheinungsbilder schematisch in Abb. 2.4 dargestellt sind. (s. a. [0])

Kolmation

Mit dem Begriff der Kolmation ist die Ablagerung von feinen Partikeln aus dem Sickerwasser an der Oberfläche eines porösen Mediums oder in den Poren bzw. Hohlräumen desselben zu verstehen. Voraussetzung für das Auftreten einer Kolmation ist immer die Suffosion eines nichtbindigen Erdstoffes. Ersatzweise kann das Suffosionskorn in einem porösen Haufwerk auch als Fremdkorn herangetragen werden. (Batereau/Baumbusch (1996)). Busch et al. [0] bezeichnen die Kolmation als Umkehrung der Suffosion und unterscheiden analog in die innere, die äußere und die Kontaktkolmation.

Böden mit $d_{10} < 0,002$ mm weisen im allgemeinen plastische Eigenschaften auf und werden aufgrund der nachweisbaren Plastizität als **bindige Erdstoffe** bezeichnet. Aufgrund der kohäsiven Eigenschaften tritt nahezu keine Bewegung einzelner Teilchen auf. Bei Überschreitung der Zugfestigkeit (=Kohäsion), werden Aggregate (=zusammenhängende Teilchen) aus der Bodenstruktur herausgelöst. Gegeneinander filterstabile bindige Lockergesteine gibt es nicht, sondern nur filterstabile oder filterinstabile Zustände (Lieberenz (1984)). Filtertechnisch ist die Größe der herausgelösten Elementaraggregate entscheidend.

Von grundsätzlicher filtertechnischer Relevanz sind besonders die in Abb. 2.6 nach Ziem (1967) [0] gekennzeichneten Typen 1/1, 2/2 und 3/3 der Kontaktsuffosion (Abb. 2.3) und Kontaktersion (Abb. 2.4).

Bei der *Kontaktsuffosion* wandern die bewegten Teilchen des feinen Erdstoffes in die Poren eines gröberen Erdstoffes. Dort setzt sich der Vorgang im allgemeinen als innere Suffosion -seltener als Kolmation- fort. Unter der *Kontaktersion* wird die von einer Kontaktfläche zu einem gröberen Erdstoff ausgehende Erosion verstanden. Die in den groben Erdstoff eindringenden Teilchen werden dort i. a. abtransportiert (Suffosion), seltener abgelagert (Kolmation). Die Sicherheit gegen Kontaktersion wird durch die Einhaltung sogenannter *Filterregeln* gewährleistet. [0]

Die in Abb. 2.6 dargestellten Haupttypen der Kontaktsuffosion und -erosion geben, mit der Unterscheidung der Lage der Kontaktfläche und der Richtung der Strömungsbelastung, maßgebende Fälle hydraulischer Beanspruchungen von Filtern wieder. Eine sinngemäße Übertragung dieser hydraulischen Lastfälle auf geosynthetische Filter -Geotextilien- wird in DVWK (1989) [0] vorgenommen (Abb. 2.5). Die Lage der Kontaktfläche kann auch zur Horizontalen bzw. Vertikalen geneigt sein.

Nach Wittmann (1980) in [0] ist weiterhin zu beachten, daß die Parallelströmung entlang der Grenzfläche hinsichtlich eines Bewegungsbeginns von Bodenteilchen etwa um den zehnfachen Wert kritischer ist als die senkrechte Strömungsbelastung.

Mit dem Begriff der Filtration und der Funktion des Filterns werden an die Leistungsfähigkeit geosynthetischer Filterelemente -Geotextilien- und mineralischer Kornfilter grundsätzlich gleiche Anforderungen gestellt. Nicht zuletzt deutlich wird dies bei Betrachtung der Zusammenhänge in Abb. 2.6 und Abb. 2.5.

Im Hinblick auf die Verhinderung des Auftretens einer Kontaktsuffosion und besonders der Kontakterosion steht die Gewährleistung der mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit gegenüber einem mineralischen Basiserdstoff während der gesamten Gebrauchsphase im Vordergrund der Aufgabe eines Filters (s. a. Abschnitt 2.1).

Mechanische Filterwirksamkeit

Die mechanische Filterwirksamkeit (auch als geometrische Sperrbedingung bezeichnet) im Zuge der Auswahl eines Filters garantiert den gemäß Aufgabe zu sichernden Kornrückhalt im Bereich des Wasseraustrittes eines durchströmten mineralischen Basiserdstoffes. Der Transport und die Umlagerung von Bodenpartikeln infolge hydraulischer Beanspruchung durch das Sicker-/Grundwasser sind über die gesamte Gebrauchsphase insoweit zu verhindern, daß keine schädlichen Verformungen des Basiserdstoffes vor dem Filter auftreten.

Hydraulische Filterwirksamkeit

Die hydraulische Filterwirksamkeit garantiert die möglichst druckverlustfreie Ab- / Weiterleitung des Sickerwassers und impliziert die Forderung nach möglichst kleinen hydraulischen Gradienten. Von einem mineralischen Kornfilter kann die druckverlustfreie Wasserableitung in aller Regel ohne weiteren Nachweis erfüllt werden. Bei Anwendung geosynthetischer Filter ist die Gewährleistung der hydraulischen Filterwirksamkeit, wie auch der Nachweis des Bodenrückhaltevermögens bemessungsrelevant.

2.3.2 FUNKTIONELLE ANFORDERUNGEN UND TEXTILTECHNISCHE PARAMETER

Die funktionellen Anforderungen an ein geosynthetisches Filterelement ergeben sich aus der dem Filter zugewiesenen Aufgabe (Abschnitt 2.1) unter Berücksichtigung der einwirkenden Beanspruchungsgrößen im Gebrauchszustand. Mit Grundlage der Beispiele charakteristischer Einsatzbereiche nach Abb. 2.1 (Flächen-, Graben- und Rohrfilter) sind als

Einwirkende Beanspruchungsgrößen

- * die Baugrundverhältnisse,
- * die hydraulischen Randbedingungen,
- * mechanische Beanspruchungen im Zuge des Einbaus und während der Gebrauchsphase,
- * nichtmechanische Beanspruchungen während des Einbaus und der Gebrauchsphase,

sowie deren Wechselwirkungen von Bedeutung (Abb. 2.7).

Den Einwirkungen gegenüber stehen als Widerstände (Abb. 2.7) in erster Linie die Struktur des geosynthetischen Filterelementes sowie die physikalischen und chemischen Eigenschaften des polymeren Grundwerkstoffes. Weitere widerstehende Größen sind die Konstruktion des Filtersystems und seine Anordnung innerhalb des Gesamtbauwerkes -Wechselwirkungen Filtersystem/Gesamtbauwerk-. Häufig werden die zuletzt genannten Widerstandsgrößen auch mit dem Begriff des sogenannten „Geokunststoffgerechten Konstruierens und Bauens“ zusammengefaßt.

Funktionelle Anforderungen

In Verbindung von Aufgabenstellung und einwirkenden Beanspruchungsgrößen können nachfolgende Kriterien zur Beschreibung der funktionellen Anforderungen an geotextile Filter abgeleitet werden:

Baugrundkriterien

Mechanisches Baugrundkriterium

Die trotz des Einbaus eines geosynthetischen Filters infolge der Strömungsvorgänge auf die Struktur des Basiserdstoffes einwirkenden hydraulischen Kräfte dürfen keine schädlichen Kornumlagerungs- und/oder Transportprozesse zur Folge haben. Der Kontaktzone zwischen Basiserdstoff und Filterelement kommt hierbei besondere Bedeutung zu.

Hydraulisches Baugrundkriterium

Das dem Filter zuströmende Wasser muß unter den systemimmanenten hydraulischen Randbedingungen (laminare, turbulente, einseitige, wechselseitige Zuströmung unter verschiedenen Anströmwinkeln) möglichst druckverlust- und rückstautfrei abgeleitet werden können.

Materialkriterium

Struktur und Material des geosynthetischen Filters sind so auszuwählen, daß sie den spezifischen örtlichen mechanischen (Spannungszustände, statische und dynamische Beanspruchungen) und nichtmechanischen (chemische, biologische, thermische Randbedingungen und den Anforderungen bezüglich der Lichtbeständigkeit) Einwirkungsgrößen widerstehen.

Einbaukriterium

Beanspruchungen des Geotextils infolge Transport, Lagerung und Einbau sind so zu minimieren, daß funktionseinschränkende Beschädigungen ausgeschlossen werden. Die Einhaltung des Einbaukriteriums ist grundlegende Voraussetzung zur Verifizierung der angenommenen Eingangsparameter zu Beginn des Entwurfs- und Bemessungsstadiums.

Bauwerkskriterium

Im Gebrauchszustand herrschende Spannungs- und Verschiebungszustände dürfen die gemäß Baugrundkriterien geforderten Funktionen nicht nachhaltig negativ beeinflussen.

Langzeitkriterium

Die Einhaltung der Anforderungen des Baugrund-, Bauwerks- und Materialkriteriums sind über die gesamte Gebrauchsphase zu garantieren. Bestehen diesbezüglich Unsicherheiten, ist die Konstruktion so zu optimieren, daß eine Sanierung möglich ist.

Sicherheitskriterium

Die Bedeutung der Funktionsfähigkeit des Filtersystems im Hinblick auf die Stand-sicherheit und die Gebrauchstauglichkeit der Gesamtkonstruktion ist zu bewerten.

Textiltechnische Parameter

Allgemeine Kenngrößen und textiltechnische Parameter beschreiben und quantifizieren die materialspezifischen Eigenschaften von Geotextilien. Die Untersuchung dieser Verhaltensweisen erfolgt durch überwiegend normierte Prüfverfahren (Tab. 2.2), die praktische Beanspruchungsfälle in aller Regel unter Laborbedingungen simulieren. Die Vorteile von Laboruntersuchungen liegen in der Möglichkeit, die Randbedingungen so zu gestalten, daß ungewollte Einflüsse anderer Einwirkungen ausgeschlossen bzw. auf ein vertretbares Maß reduziert werden können. Hingegen ist die Simulation von Wechselwirkungen mehrerer Einflußgrößen in idealisierten, meist kleinmaßstäblichen Versuchen nur bedingt möglich. Über die in Tab. 2.2 zusammengestellten Prüfungen mit Normencharakter hinaus gibt es weitere, sogenannte standardisierte Prüfverfahren, z. B. das *Durchströmungsverfahren* und den *Turbulenztest* nach den RPG (1984) [0], die als Systemprüfungen an Geotextil-Boden-Konstruktionen durchgeführt werden.

Kurztitel	DIN	EN	ISO
Flächenmasse	DIN EN 965 (1995-05)	EN 965 (1995-03)	ISO 9864 (1990-09)
Dicke			
Einzellagen	DIN EN 964-1 (1995-05)	EN 964-1 (1995-03)	ISO 9863 (1990-10)
mehrlagig	DIN EN ISO 9863-2 (1996-10)	EN ISO 9863-2 (1996-08)	ISO 9863-2 (1996-08)
Höchstzugkraft / -dehnung			
Vliesstoffe, b = 50 mm	DIN EN 29073-3 (1992-08)	EN 29073-3 (1992-06)	ISO 9073-3 (1989-07)
Stempeldurchdruckkraft	DIN EN ISO 12236 (1996-04)	EN ISO 12236 (1996-02)	ISO 12236 (1996-10)
Beschädigung beim Einbau			
Pyramiden-Fallversuch	E DIN 60500-1 (1992-07)		
Kegel-Fallversuch	DIN EN 918 (1996-02)	EN 918 (1995-12)	ISO/DIS 13433 (1996-03)
Abriebverhalten	E DIN EN ISO 13427 (1996-01)	prEN ISO 13427 (1995-10)	ISO/DIS 13427 (1995-10)
Wirksame Öffnungsweite	E DIN EN ISO 12956 (1996-02)	prEN ISO 12956 (1995-11)	ISO/DIS 12956 (1995-11)
Wasserdurchlässigkeit k_v			
ohne Auflast	E DIN EN 12040 (1995-09)	prEN 12040 (1995-07)	ISO/DIS 11058 (1995-07)
mit Auflast	E DIN 60500-4 (1997-02)		
Wasserdurchlässigkeit k_h			
parallel	E DIN EN ISO 12958 (1996-02)	prEN ISO 12958 (1995-11)	ISO/DIS 12958 (1995-11)
radial	E DIN 60500-8 (1997-03)		

Tab. 2.2: Zusammenstellung von Prüfverfahren zur Bestimmung ausgewählter textiltechnischer Parameter und Eigenschaften; Stand 02/97 (aus Mägel (1997))

Aus filtertechnischer Sicht sind besonders jene Kenngrößen und Prüfmethoden relevant, die Aussagen zur *Porengröße*, der *Porenraumgeometrie*, dem *Wasserdurchlässigkeitsverhalten* und dem *Bodenrückhaltevermögen* eines Geotextils ermöglichen. Es sind dies die sogenannten hydraulischen Parameter nach Wilmers (1994) [0] -wirksame Öffnungsweite O_{90} (siehe hierzu auch Fischer et al. (1995) in [0]), Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte k_v und k_h , Materialdicke- und die nach [0] genannten Prüfungen des Durchströmungsverfahrens und des Turbulenztests. Im Hinblick auf die Aussagekraft des Systemverhaltens in-situ, sind Systemprüfungen mit Geotextilien + Erdstoffen solchen Untersuchungen überlegen, deren Methodik ausschließlich auf der Untersuchung fabrikneuer Materialien ohne Bodenkontakt aufbaut.

Auch die Prüfmethoden nach ASTM D 5101-90 -Gradient Ratio Test- und ASTM D 5141-91 liefern Aussagen zum Wasserdurchlässigkeitsverhalten/Bodenrückhaltevermögen. Der Gradient Ratio Test untersucht die Wasserdurchlässigkeit bzw. das Versagenspotential durch Porenverstopfung an Geotextil-Boden-Systemen bei vertikaler Durchströmung von oben nach unten. Nach ASTM D 5141-91 werden die Filterwirksamkeit und die Durchflußrate von Geotextilien mit einer Suspension aus Boden und Wasser geprüft

-Maßgebendes Untersuchungsziel ist die Bewertung des Bodenrückhaltevermögens-.

2.3.3 VERHALTEN WÄHREND DER GEBRAUCHSPHASE

Das Verhalten eines geotextilen Filters in der Gebrauchsphase (Abb. 2.9) gibt Aufschluß darüber, inwieweit die Gewährleistung der funktionellen Anforderungen sichergestellt ist, bzw. Einwirkungen und Randbedingungen die Funktionstüchtigkeit einschränken können. Eine Einschränkung einzelner oder mehrerer funktioneller Anforderungen ergibt sich hierbei stets aus einer Wechselwirkung zwischen dem Geotextil und den Einwirkungen der umgebenden Medien (Batereau (1981)).

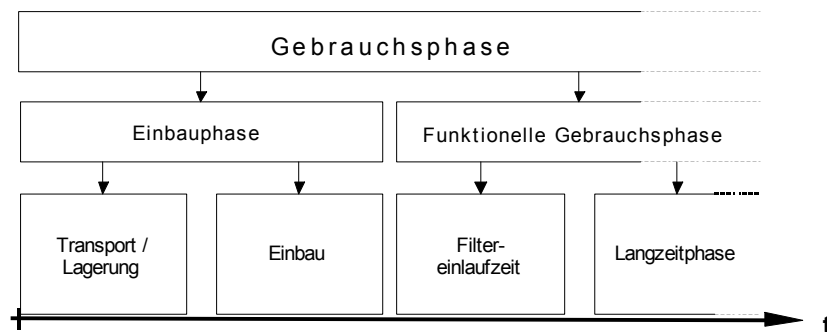


Abb. 2.9: Verlauf der Gebrauchsphase eines geosynthetischen Filters

Setzt man voraus, daß eine Beschädigung des Geotextils infolge Transport und Lagerung mit vergleichsweise einfachen Maßnahmen verhindert werden kann, sind im Hinblick auf die Funktionstüchtigkeit eines geosynthetischen Filters während der Gebrauchsphase

- * mechanische Beanspruchungen im Zuge des Einbaues,
- * der Verlauf der Filtereinlaufzeit und
- * das Verhalten während der Langzeitphase
 - * geohydraulisches Verhalten
 - * Einflüsse auf die Beständigkeit

von Bedeutung.

Einbauphase

Bestandteil aller maßgebenden Bemessungsregeln eines geotextilen Filters nach [0], [0], [0], [0], [0] etc. ist, daß eine nachhaltige, die Filterfunktion einschränkende Schädigung des Geotextils im Zuge des Einbaus, z. B. durch das Überspannen von Hohlräumen, verhindert wird. Die praktische Umsetzung der Einbauanforderungen kann durch eine ausreichende Robustheit des Geotextils gegenüber mechanischen Beanspruchungen in Form von Zug-, Druck-, Schubkräften, Abrieb, Walkbeanspruchung oder Kombinationen hieraus gewährleistet werden.

Koerner/Koerner (1990) [0] stellen Resultate umfangreicher Ausgrabungen von Geotextilien im Straßenbau Nordamerikas vor. Sie berichten, daß die Beschädigung der entnommenen Geotextilien während des Einbaus als besorgniserregend einzustufen ist und belegen diese Feststellung mit Untersuchungsergebnissen zum Spannungs-/Dehnungs- und dem Perforationsverhalten. Im Zusammenhang mit der Funktion eines Filters sehen sie Einbaubeschädigungen von Geotextilien als grundsätzlich problematisch an. Christopher/Holtz (1984) in [0] quantifizieren die mechanische Einbaubeanspruchung eines Geotextils in der Rangfolge: Nicht vertretbar, sehr hoch, hoch, mittel, niedrig und setzen ihre Klassifizierung in Beziehung zur Beschaffenheit des Planums und der durch die Einbautechnologie/Geräteausstattung auf den Schichtenaufbau einwirkenden Sohldrücke. Koerner/Koerner [0] beurteilen diese Einteilung aufgrund ihrer Ergebnisse als kritisch.

Nach [0] entzieht sich die durch das Schüttmaterial und den Baustellenverkehr eingeleitete mechanische Walkbeanspruchung eines Geotextils der Bemessung. Es wird deshalb eine aus empirisch gewonnenen Erkenntnissen abgeleitete Einteilung vorgenommen, die Geotextilien in *Robustheitsklassen 1-5* einteilt.

Weitere Angaben und Erkenntnisse zur mechanischen Beanspruchung von Geotextilien während des Einbaus können einer großen Anzahl weiterer Literaturstellen entnommen werden, z. B. [0], [0], [0], [0], [0], [0], [0], [0] und andere.

Filtereinlaufzeit

Der derzeitige Kenntnisstand zum Wasserdurchlässigkeitsverhalten von Geotextil-Boden-Systemen beruht vornehmlich auf Ergebnissen der Simulation von „in-situ Verhältnissen“ unter Laborbedingungen. Mit Ausnahme weniger Untersuchungen weist man die hydraulische und mechanische Filterwirksamkeit eines Geotextils nach, indem Randbedingungen der Betrachtungsweisen mineralischer Kornfilter übertragen werden (Lastfälle I und II nach Abb. 2.5). Vorgenannte Modellierungsansätze vermögen jedoch nur solche Prozesse und Mechanismen abzubilden, die entweder sowohl bei mineralischen Kornfiltern als auch bei geosynthetischen Filterelementen unter sonst gleichen Randbedingungen beobachtet werden können, oder die, obwohl kennzeichnend für Geotextilien, auch unter den Prüfbedingungen mineralischer Kornfilter auftreten.

Nach Rollin/Lombard (1988) in [0] sind während der Einlaufzeit eines geotextilen Filters die in Abb. 2.10 dargestellten Mechanismen der Stabilisierung eines Filtersystems zu berücksichtigen. Bild (a) zeigt die Kontaktzone zwischen einem nichtbindigen Basiserdstoff mit gut abgestuftem, stetig verlaufendem Körnungsband (Sekundärfilteraufbau). Für die in Bild (b) dargestellten Verhältnisse findet eine Brückenbildung der Einzelkörner des Basiserdstoffes vor dem Filter statt. Als aus filtertechnischer Sicht problematisch ist die in Bild (c) dargestellte Situation des Blindings zu bewerten. Bevorzugt kann sich diese Situation für Böden einstellen, deren Körnungsband durch die Präsenz von Ausfallkörnungen und/oder suffosionsgefährdeten Korngruppen gekennzeichnet ist.

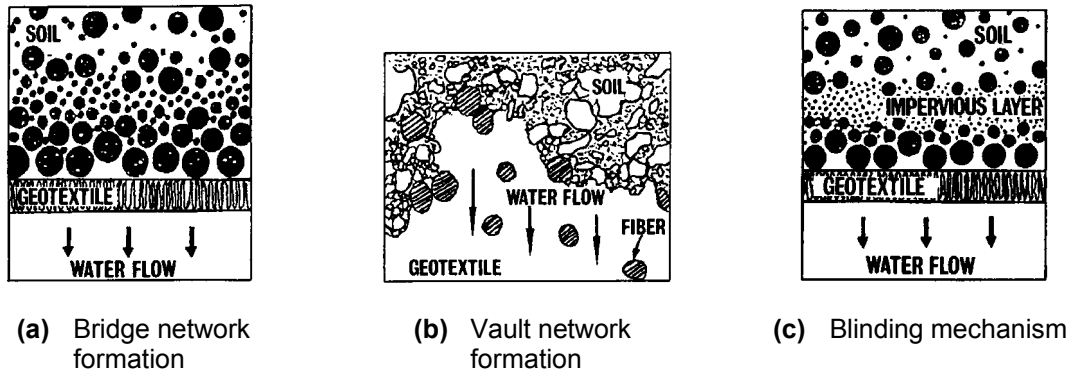
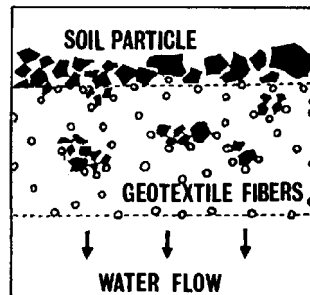
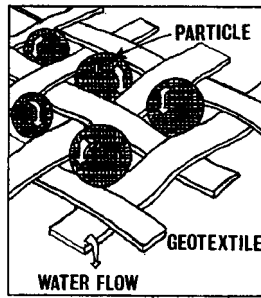


Abb. 2.10: Mechanismen in der Kontaktzone eines Basiserdstoffes (Rollin/Lombard (1988) in [0])

Ein weiterer Mechanismus, der das Wasserdurchlässigkeitsverhalten eines Geotextils nachhaltig negativ beeinflussen kann, ist der unter der Bezeichnung „*Blocking*“ bekannte Prozeß. Nach einem Arbeitspapier (1997-10) der WG 2 der European Organization for Standardization -CEN- wird der Prozeß des Blockings als die Ablagerung von Bodenpartikeln und/oder anderen Materialien auf der Oberfläche eines Geotextils oder geotextilverwandten Produktes definiert, der zu einer Abnahme der Wasserdurchlässigkeit führt (Bild (a) in Abb. 2.11). Der im Zusammenhang mit der Filtereinlaufzeit erläuterte Blockierungseffekt ist ein plötzlich eintretendes Ereignis, das von rein geometrischen Randbedingungen abhängig ist und kann bei Geweben nach Batereau (1993) zur Abnahme der Wasserdurchlässigkeit um bis zu 2 Zehnerpotenzen führen.

Nicht gleichzusetzen ist der Prozeß der Porenblockierung mit dem Mechanismus der Porenverstopfung nach Abb. 2.11 Bild (b), auch unter der Bezeichnung „*Clogging*“ bekannt. Der Begriff des Cloggings steht nach obigem Arbeitspapier für die Ablagerung von Bodenpartikeln oder anderem Material in den Öffnungen eines Geotextils oder geotextilverwandten Produktes -innerhalb der Porenstruktur- mit einem dadurch verbundenen Rückgang der Wasserdurchlässigkeit. Nach Rollin et al. (1977) in [0] wird die Geometrie der Porenkanäle in Zonen, deren Wasserdurchlässigkeit infolge Cloggings herabgesetzt ist, mit trichterförmig verlaufenden Kanälen verglichen, d. h. die wirksamen Porenkanaldurchmesser nehmen in Fließrichtung ab.



(a) Schematic of blocking mechanism (b) Schematic of clogging mechanism

Abb. 2.11:

Porenblockierung (Blocking) und Porenverstopfung (Clogging) bei Geotextilien (Mlynarek et al. (1990a) in [0])

Dierickx (1994) [0] und Rollin et al. (1987) [0] stellen Ergebnisse aus Untersuchungen zu Mechanismen vor, die besonders während der Einlaufzeit die Funktionstüchtigkeit eines geotextilen Filters einschränken können. Es handelt sich hierbei um die für Kunststoffe häufig beobachtete Eigenschaft, einem Wasserein- bzw. -durchtritt bis zu einer bestimmten hydraulischen Höhe in Form eines Benetzungswiderstandes zu widerstehen. Größe und Intensität der Abstoßungskräfte und Oberflächenspannungen im System Polymer-Wasser-Luft sind abhängig von der Porengrößenverteilung, der Faseranordnung innerhalb der Struktur und der textiltechnischen Oberflächenausrüstung der Fasern.

Während die von Dierickx und Rollin et al. vertretenen Auffassungen der Forderung nach einer Untersuchung spezifischer Probleme zum Wasserdurchlässigkeitsverhalten von Geotextilien nachkommen, trifft dies für die auch von Mlynarek [0] kritisch betrachteten

Filterversuche zur Beschreibung des Wasserdurchlässigkeitsverhaltens nach Lastfall I/2 in Abb. 2.5 nur unter bestimmten Randbedingungen zu.

Es ist aus wissenschaftlicher als auch praktischer Sicht gesichert, daß eine zuverlässige Filterauswahl und -bemessung für den in Abb. 2.5 dargestellten hydraulischen Lastfall I/2 nach derzeitig gültigen Regelwerken für eine Vielzahl von Anwendungsfällen möglich ist. Der Intimate Contact während des Einbaus wird infolge des Eigengewichtes des Basiserdstoffes quasi erzwungen. Die genau definierten Randbedingungen dieses Lastfalles ergeben, sowohl unter Laborbedingungen als auch in-situ, eine maximale Beanspruchung der Kornstruktur des Basiserdstoffes bei hydraulischer Belastung durch das Sickerwasser.

Maßgebende Unterschiede der Filterbelastung des hydraulischen Lastfalles II/2 zu Lastfall I/2 in Abb. 2.5 sind die Schichtenfolge und die Wirkungsrichtung der Strömungskraft. Planum und zugleich Unterlage ist der Basiserdstoff, der infolge aufwärtsgerichteter Strömung durch einen geotextilen Filter geschützt wird. Als kritisch einzustufen sind Verhältnisse, bei denen die aufwärtsgerichtete Strömungskraft gerade den Betrag des Eigengewichtes des Basiserdstoffes erreicht und/oder überschreitet. Die erforderliche Filterauflast wird durch den nachträglich aufgebrachtten gröberen Erdstoff erzielt.

In diesem Zusammenhang bildet die Beschaffenheit des Planums, besonders die Ebenflächigkeit, eine maßgebende Voraussetzung für den vollflächigen Kontakt zwischen geotextilem Filter und Basiserdstoff. Während die Eigenschaft geotextiler Filter, Hohlräume aufgrund ihrer Struktur mit innerem Verbund zu überspannen, bekannt ist und im Zuge der Untersuchung der mechanischen Einbaubeanspruchungen durch Überschüttung und Baustellenverkehr berücksichtigt wird, liegen zur filtertechnischen Bedeutung dieser Verhaltensweise keine genauen Erkenntnisse vor, sieht man von der nachträglichen Analyse von Schadensfällen ab. Auf die Problematik einer wechselseitigen hydraulischen Filterbelastung durch Umkehrung der Anströmrichtung oder der hydraulischen Beanspruchung durch Pumpeffekte und Pulsation, die beispielsweise in Teindl [0], Heerten [0], Lafleur et al. [0], Köhler [0] und bei anderen Autoren behandelt werden, soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

Die Systembedingungen des hydraulischen Lastfalles III/2 nach Abb. 2.5 bilden, betrachtet man die durch den Basiserdstoff in LF I/2 und die Überschüttung in LF II/2 erzielte „Klemmwirkung“, eine für den geotextilen Filter sehr ungünstige Auflastsituation ab. Weiterhin können sich infolge Gravitation filterparallele Strömungen einstellen, die nach Wittmann (1980) in [0] ein etwa 10-fach höheres Risiko des Bewegungsbeginnes von Bodenteilchen beinhalten (Wittman äußert sich zwar zur Wahrscheinlichkeit eines Transportes von Bodenteilchen bei filterparalleler Strömung, bezieht seine Aussagen jedoch auf den Einsatz mineralischer Kornfilter). Während sich beispielsweise Mühling [0] anhand seiner Untersuchungen intensiv mit dem Stabilisierungsvermögen geotextiler Filter und Verbundstoffen auf geneigter Unterlage befaßt, liegen zu den Auswirkungen unzureichender Kontaktverhältnisse keine spezifischen Untersuchungsergebnisse vor -ausgenommen hiervon ist die nachträgliche Analyse von Schadensfällen-.

Langzeitphase

Die Langzeitphase eines geotextilen Filters erstreckt sich über den weitaus größten Abschnitt der gesamten Gebrauchsphase (Abb. 2.9). Nach [0], [0] und anderen sind mit dem Ende der Einbauphase die Zeiträume und Abschnitte größter Belastungen eines Geotextils abgeschlossen. Grundsätzlich ausgenommen hiervon sind außerplanmäßig einwirkende extreme Beanspruchungen in Ausnahme- und Sonderfällen. Im Hinblick auf Fragen der Beständigkeit vertritt Batereau [0] die Auffassung, daß weniger die Beständigkeit der

Struktur und Fasern des Geotextils als viel mehr die Funktionstüchtigkeit im filtertechnischen Sinne im Vordergrund steht.

Teindl [0] führt, neben anderen Untersuchungen, Langzeitfilter- und -suffosionsversuche mit Geotextilien zum Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit von teilweise mehr als 80 Tagen Dauer unter Laborbedingungen durch (Prüfbedingungen nach Lastfall I/2 in Abb. 2.5). Heerten [0] prüft die Wasserdurchlässigkeit und den Grad der Bodeneinlagerung von langjährig in Bauwerken des Wasserbaus eingesetzten Geotextilien. An dieser Stelle exemplarisch aufgeführt, dokumentiert er anhand einer Entnahmestelle im Deckwerk eines Seedeiches, daß die entnommenen Vlies- und Verbundstoffe den Anforderungen der mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit gerecht werden (Prüfbedingungen nach Lastfall I/2 in Abb. 2.5). Batereau [0] schätzt mit Basis von Suspensionsversuchen die Gefahr von Kolmationsvorgängen bei geotextilen Filtermaterialien ein. Er unterscheidet eine Kolmation infolge geometrischer Sperrbedingung -Blockierungseffekt- und eine Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit infolge von Anlagungsvorgängen feiner Bodenpartikel auf den Oberflächen der textilen Fasern. Wichtiger Bestandteil seiner Betrachtungsweise zum Wasserdurchlässigkeitsverhalten von Geotextilien ist, daß er den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert) als nicht geeignet erachtet, auftretende Prozesse und Mechanismen zu beschreiben. Anstelle des k_f -Wertes analysiert er das Wasserdurchlässigkeitsverhalten über die Angabe eines Durchströmungswiderstandes der Geotextilien.

Lieberenz (1984, 1986) untersucht die Funktionstüchtigkeit von Tiefenentwässerungen in Bahnanlagen. Es werden Geotextilien entnommen, die als Rohr- und Grabenfilter Funktionszeiträume zwischen 5 und 9 Jahren aufwiesen. Die Funktionstüchtigkeit der Tiefenentwässerungen ist nach Lieberenz (1986) bei geringem Aufwand für die Unterhaltung der Anlagen (Kontrollen, Spülen von Drainageleitungen etc.) gewährleistet. Sowohl die ausreichende Wasserdurchlässigkeit der Geotextilien als auch die Verhinderung von Kornumlagerungen (Erosion, Kolmation) sind gesichert. Eine anfängliche Kontaktsuffosion garantiert den Aufbau stabiler natürlicher Filter im Anströmbereich. Mlynarek et al. [0] beziehen ihre Erkenntnisse zum Langzeitfilterverhalten geotextiler Filter auf Felduntersuchungen in einem geschütteten Erddamm.

Kossendey et al. [0] untersuchen die Langzeit-Filterfunktion verschiedener Geotextilien und Basiserdstoffe in Permeameterversuchen mit einer Filterbeanspruchung analog Lastfall I/2 in Abb. 2.5. Mit Versuchszeiträumen von mehr als 550 Tagen für Lößlehm und etwa 310 Tagen für andere Basiserdstoffe größerer Durchlässigkeit bescheinigen sie allen Systemen unter den spezifischen Randbedingungen eine volle Funktionstüchtigkeit (Bodenrückhalt und Durchlässigkeit) bei grundsätzlich gleicher qualitativer Entwicklung der Durchflußraten.

Obige Übersicht einiger weniger Arbeiten und Untersuchungsprogramme hinsichtlich des Langzeitfilterverhaltens zeigt auszugsweise, auf welche vielfältigen Erkenntnisse zurückgegriffen werden kann; weitere Untersuchungen werden auch in [0], [0], [0], [0], [0], [0], [0], [0], [0] und anderen vorgestellt. Grundvoraussetzung dieser überwiegend positiven Erfahrungen sind die unter der Rubrik des geokunststoffgerechten Planens, Konstruierens und Bauens zusammengefaßten Aspekte. Geradezu den Charakter einer Antithese haben hierzu Schadensfälle funktionsuntüchtiger Systeme praktischer Anwendungsfälle mit teils schwerwiegenden Folgen, die unter Abschnitt 2.4 behandelt werden. Floss (1997) sieht das geokunststoffgerechte Planen und Bauen betreffend noch erheblichen Handlungs- und Ausbildungsbedarf.

Die Thematik der Beständigkeit von Geotextilien gegenüber chemischen, physikalischen (ohne mechanische Beanspruchungen während des Einbaus) und biologischen Einwirkun-

gen bezieht sich, u. a., maßgebend auf die Art des verwendeten Polymers und die Einflüsse der Herstellung bzw. Verfestigung. Sachverhalte und Fragen der Beständigkeit werden, neben den in Abschnitt 2.2 enthaltenen Angaben zum Verhalten polymerer Rohstoffe gegenüber verschiedenen Einwirkungen, in [0], [0], [0], [0], [0], [0], [0], [0], [0], [0] und anderen diskutiert. Mit Hinweis auf die einschlägige Fachliteratur und Abschnitt 2.2 werden diese nicht weiter erörtert.

2.3.4 BEMESSUNGSANSÄTZE

Eine maßgebende Schnittstelle im Zuge der Umsetzung der funktionellen Anforderungen (Abschnitt 2.3.2) an einen geotextilen Filter bildet die Bemessungsphase. Einem Bemessungsalgorithmus vorgeschaltet ist in aller Regel die Überprüfung der grundsätzlichen Notwendigkeit eines Filters. Diese liegt immer dann vor, wenn zwei aneinandergrenzende mineralische Erdstoffe in ihrer Kontaktfläche als nicht filterstabil zueinander gelten d. h., die Sicherheit gegen Kontaktersion (s. a. Abb. 2.4) in der Grenzfläche nicht gegeben ist.

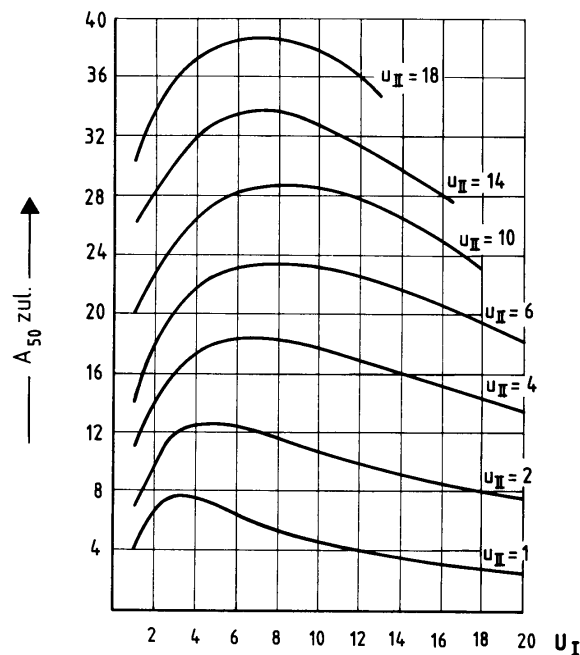


Abb. 2.12: Zulässiges Abstandsverhältnis $A_{50, \text{zul.}}$ bei Kontaktersion nach Cistin/Ziems in [0]

Unter Beachtung der jeweils gültigen Randbedingungen von Filterkriterien mineralischer Kornfilter kann diese Überprüfung vergleichsweise einfach erfolgen, so z. B. mit der Berechnung des zulässigen Abstandsverhältnisses $A_{50, \text{zul.}}$ für nicht- bzw. schwachbindige Erdstoffe nach dem in Abb. 2.12 dargestellten Diagramm von Cistin/Ziems in [0] (Gl. 2.4).

$$A_{50, \text{zul.}} = \frac{D_{50}}{d_{50}} \quad [-] \quad \text{Gl. 2.4}$$

Eine Vielzahl weiterer Kriterien, z. B. Therzaghi/Peck [0], Sichardt [0] etc. zur Bemessung mineralischer Kornfilter stehen zur Verfügung und werden beispielsweise in VSN-02-65 (1965), WAPRO 4.04 (1970), Davidenkoff (1976), Schuler/Brauns (1992) oder Batereau

(1992) mit ihren Gültigkeitsbereichen genannt und diskutiert. Das Filterverhalten bindiger Erdstoffe ist nicht Gegenstand der hier durchgeführten Untersuchungen.

Im Hinblick auf die Bemessung geotextiler Filter werden Böden in [0] (Abb. 2.13) ihrem hydraulischen Verhalten nach in Bodentypen der Körnungsbereiche I, II und III eingeteilt (analoge Zuordnung nach [0]). Böden mit einem erheblichen Anteil im Schluff- und Feinsandbereich und geringen kohäsiven Eigenschaften werden als filtertechnisch schwierige Böden eingestuft. Die Kornverteilungslinie dieser Böden liegt i. a. im Körnungsbereich II. Eine weitere Zuordnungsmöglichkeit mineralischer Basiserdstoffe besteht in der Anwendung des Bodentypverfahrens der Bundesanstalt für Wasserbau in [0].

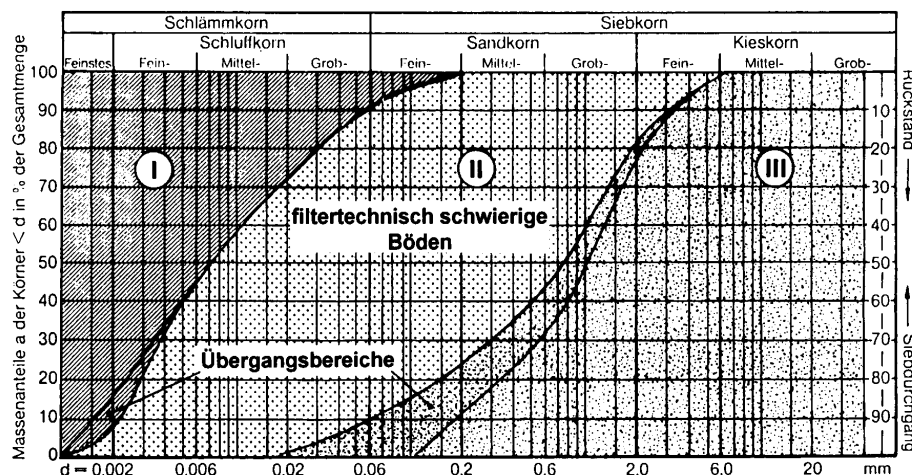


Abb. 2.13: Körnungsbereiche für Bodentypen mit unterschiedlichem hydraulischem Verhalten [0]

Körnungsbereiche		Kriterien für einen Boden mit hoher Einzelkornmobilität:
A	Böden mit $d_{40} \leq 0,06$ mm	1. Kornfraktion $< 0,06$ mm und $U = d_{60}/d_{10} < 15$
		2. $0,02$ mm $< d < 0,1$ mm > 50 %
		3. $I_p < 0,15 = 15$ % oder ersatzweise Tonanteil/Schluffanteil $< 0,5$
B	Böden mit $d_{15} \geq 0,06$ mm	1. Kornfraktion $< 0,06$ mm und $U = d_{60}/d_{10} < 15$
		2. $0,02$ mm $< d < 0,1$ mm > 50 %
C	Böden mit $d_{15} \leq 0,06$ mm und $d_{40} > 0,06$ mm	1. Kornfraktion $< 0,06$ mm und $U = d_{60}/d_{10} < 15$
		2. $0,02$ mm $< d < 0,1$ mm > 50 %
		3. $I_p < 0,15 = 15$ % oder ersatzweise Tonanteil/Schluffanteil $< 0,5$

Tab. 2.3: Klassifizierung von Böden in Körnungsbereiche A, B und C nach [0]

Auf der Grundlage der im Erd- und Grundbau gebräuchlichen Normen zur Klassifizierung und Benennung von Böden (DIN 18196 und DIN 4022 u. a.) wird bei den Bemessungsansätzen geotextiler Filter in DVWK ([0], [0]) zwischen drei Körnungsbereichen A, B und C unterschieden (Tab. 2.3). Filtertechnische Problemböden neigen bei entsprechender Belastung zu einer hohen Mobilität der Einzelkörner.

Mit Rücksicht auf die hydraulische Leistungsfähigkeit des Filters sollten die Obergrenzen der Öffnungsweite, die bei Gewährleistung der mechanischen Filterfestigkeit zulässig sind,

ausgenutzt werden, da eine offene Struktur in der Regel einer dichten, dünnen im Hinblick auf die Filterstabilität überlegen ist, z. B.:

$$O_{90, w, \text{ gewählt}} = 0,8 \text{ bis } 1,0 * O_{90, w, \text{ zulässig}} \quad [\text{ mm }] \quad \text{Gl. 2.5}$$

Hierdurch wird auch der Kolmationssicherheit Rechnung getragen (Batereau (1988)). Als Untergrenze von $O_{90, w, \text{ gewählt}}$ wird in Wilmers (1994) im Hinblick auf die hydraulische Filterwirksamkeit die Beziehung nach Gl. 2.6 angegeben.

$$O_{90, w, \text{ gewählt}} \geq 0,2 * O_{90, w, \text{ zulässig}} \quad [\text{ mm }] \quad \text{Gl. 2.6}$$

Bei Beurteilung der hydraulischen Filterwirksamkeit und einer möglichst druckverlustarmen Entwässerung muß der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_v des Geotextils unter der Normalspannung 2 kPa -multipliziert mit einem Abminderungsfaktor η - größer als der Durchlässigkeitskoeffizient des anstehenden Bodens -Überschlagswerte in [0], [0], [0]- sein:

$$\eta * k_v \geq k \quad [\text{ m/s }] \quad \text{Gl. 2.7}$$

Für relativ dünne Geotextilien (Gewebe und dünne Vliesstoffe mit einer Dicke $d < 2,0 \text{ mm}$), deren Filterverhalten vergleichbar ist (Teindl (1980)), kann für einen bestimmten Geltungsbereich ($0,01 \text{ mm} \leq d_{10} \leq 0,5 \text{ mm}$) der Abminderungsfaktor η_G in Abhängigkeit vom

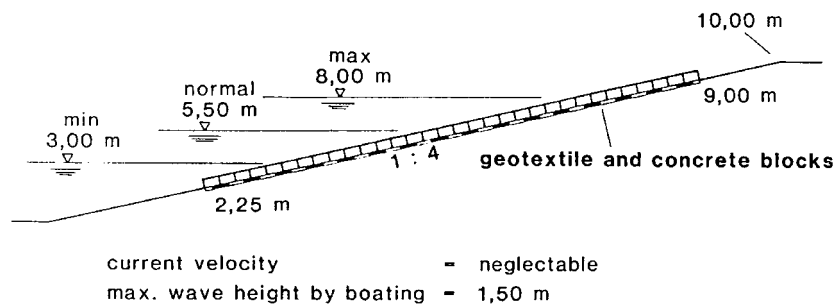


Abb. 2.14: Konstruktionsvorschlag für die Ausführung langfristig funktionstüchtiger Deckwerke ([0])

Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_v und des Korndurchmessers d_{10} des abzufilternden Bodens angegeben werden (Abb. 2.15).

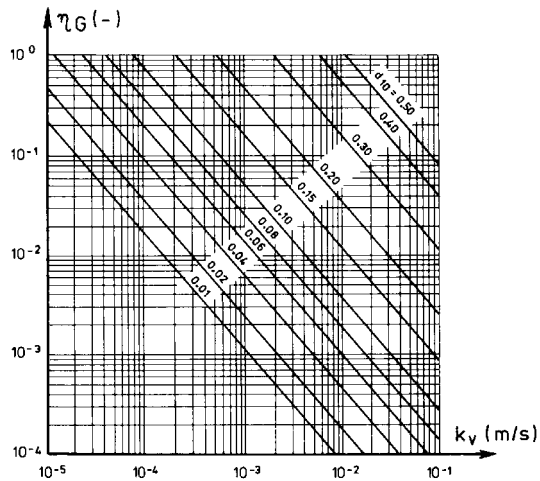


Abb. 2.15: Bestimmungsdigramm für den Abminderungsfaktor η_G des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes für Gewebe und dünne Vliesstoffe mit Dicken bis ca. 2,0 mm (Heerten (1981) in [0])

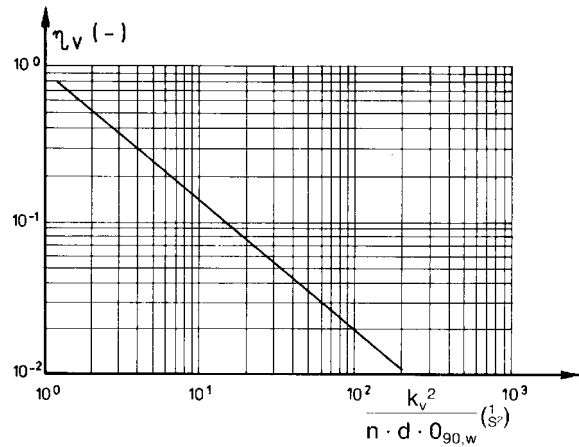


Abb. 2.16: Bestimmungsdigramm für den Abminderungsfaktor η_v des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes (mechanisch verfestigte Vliesstoffe mit Dicken ab ca. 2,0 mm) in Kontakt zu Schluffen und Sanden (Heerten (1982) in [0])

Abbildung 2.16 ausgelagert

Abb. 2.17: Vereinfachtes Fließdiagramm zur Filterbemessung (Saathoff [0] in [0])

Aus Untersuchungen an langfristig eingebauten, mechanisch verfestigten Vliesstoffen ist bekannt, daß die hydraulische Filterwirksamkeit für diese Geotextilien (Filterschichtdicke: $30 * O_{90,w} \leq d \leq 50 * O_{90,w}$), für Schluffe und Sande als gewährleistet anzusehen ist, wenn der am fabrikneuen Produkt unter der Normalspannung von 2 kPa gemessene Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_v den Durchlässigkeitskoeffizienten k des Bodens etwa um das 50-fache übersteigt ($\eta \leq 1/50 = 0,02$) (in [0]):

$$k_v \geq 50 * k \quad [\text{m/s}] \quad \text{Gl. 2.8}$$

Für stark schluffige Sande bis Sande kann zur genaueren Erfassung der hydraulischen Filterwirksamkeit von mechanisch verfestigten Vliesstoffen mit $d \geq 2 \text{ mm}$ der Abminderungsfaktor η_v aus Abb. 2.16 ermittelt werden.

Den Bemessungsalgorithmus zum Nachweis der mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit in [0] hat Saathoff [0] in einem vereinfachten Fließdiagramm zur Filterbemessung (Abb. 2.17) zusammengefaßt. Hierzu haben die Untersuchungen in Saathoff [0] einen maßgebenden Anteil beigetragen.

Im Hinblick auf die Dicke des eingesetzten geotextilen Filters leiten Wittmann/Heerten (1984) auf Basis theoretischer Betrachtungen und Erfahrungen von Ausgrabungen langfristig eingebauter Geotextilien Anhaltswerte der Dicke d des zu wählenden Geotextils her.

$$d \geq (25 \text{ bis } 50) * O_{90, w, \text{ gewählt}} \quad [\text{mm}] \quad \text{Gl. 2.9}$$

Während Wittmann/Heerten (1984) und Saathoff (1987b) einen erheblichen Einfluß der Dicke des eingesetzten geotextilen Filters auf die Funktionstüchtigkeit sehen, sind andere Autoren, z. B. Rollin et al. (1993), Berkhout (1993), Kossendey et al. (1996a) der Auffassung, daß von der Dicke kein Einfluß auf das Filterverhalten ausgeht.

Einen weiteren Aspekt, die Diskussion der Bedeutung der Geotextildicke betreffend, untersuchen Eichenauer et al. (1994). Sie geben an, daß nicht das Absolutmaß der Dicke ausschlaggebend ist, sondern die Anzahl der Filamentlagen eines Geotextils, wobei für einseitige Anströmung 25-75 Lagen als erforderlich angesehen werden, für wechselseitige Durchströmung 50-100 Lagen (in [0]).

Neben dem hier ausführlich dargestellten Algorithmus zur Auswahl und Bemessung geotextiler Filter nach DVWK [0] existieren eine Vielzahl weiterer Kriterien zum Nachweis der mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit von Geotextilien, die auszugsweise in Tab. 2.4 und Tab. 2.5 zusammengefaßt sind. Auf die Beachtung der jeweiligen Gültigkeitsgrenzen dieser Kriterien und die Problematik der Vergleichbarkeit mittels unterschiedlicher Verfahren bestimmter wirksamer Öffnungsweiten von Geotextilien ist hinzuweisen. Allen im Rahmen dieser Arbeit genannten Bemessungsansätzen gemein ist nach vorliegendem Kenntnisstand die Randbedingung des vollflächigen Kontaktes -Intimate Contact- zwischen Basiserdstoff und geotextilem Filter.

Es erscheint ebenso erforderlich, klar zwischen Anwendungsfällen des reinen Filterns im bodenmechanischen Sinne, dem Stabilisieren der Kontaktfläche eines Basiserdstoffes in Form eines Erosionsschutzes -siehe hierzu auch Untersuchungen von Mühring (1989)- und Kombinationen dieser Funktionen zu unterscheiden. Vorgenannte Betrachtungsweise wird auch in dem bereits erwähnten CEN-Arbeitspapier der WG 2 (1997) und IVG (1997) durch eine Unterscheidung der Funktionen Filtern und Erosionsschutz, neben anderen Funktionen von Geokunststoffen, aufgegriffen.

Autor / Quelle	Kriterium	Bemerkungen
Calhoun (1972)	$O_{95} / d_{85} \leq 1$	Gewebe, Böden mit $d_{50} > 0,075$ mm (Sieb #200)
	$O_{95} \leq 0,2$ mm	Gewebe, kohäsive Böden
Zitscher (1975)	$O_{50} / d_{50} \leq 1,7 - 2,7$	Gewebe, Böden mit $C_u \leq 2$, $d_{50} = 0,1-0,2$ mm
	$O_{50} / d_{50} \leq 25 - 37$	Vliesstoffe, kohäsive Böden
Sweetland (1977)	$O_{15} / d_{85} \leq 1$	Vliesstoffe, Böden mit $C_u = 1,5$
	$O_{15} / d_{15} \leq 1$	Vliesstoffe, Böden mit $C_u = 4,0$
Schober & Teindl (1979)	$O_{90} / d_{50} \leq 2,5 - 4,5$	Gewebe und dünne Vliesstoffe, abhängig von C_u
	$O_{90} / d_{50} \leq 4,5 - 7,5$	Dicke Vliesstoffe, abhängig von C_u , Schluffe und Sande
Rankilor (1981)	$O_{50} / d_{85} \leq 1$	Vliesstoffe, Böden mit $0,2 \leq d_{85} \leq 0,25$ mm
	$O_{15} / d_{15} \leq 1$	Vliesstoffe, Böden mit $d_{85} > 0,25$ mm
Giroud (1982)	$O_{95} / d_{50} \leq (9-18) / C_u$	Abhängig von der Ungleichförmigkeit des Bodens C_u und Dichte Feine Bodenpartikel können bei größerer Ungleichförmigkeit abtransportiert werden
Carroll (1983)	$O_{95} / d_{85} \leq 2 - 3$	Gewebe und Vliesstoffe
Christopher & Holtz (1985)	$O_{95} / d_{85} \leq 1 - 2$ $O_{95} / d_{15} \leq 1$ oder $O_{50} / d_{85} \leq 0,5$	Abhängig von Bodenart, C_u Dynamische, zyklische Filterbelastung und Pulsation, wenn Bodenstruktur sich unterhalb des Geotextils bewegen kann
Task Force #25 (1986)	50 % $\leq 0,074$ mm, $O_{95} < 0,59$ mm 50 % $> 0,074$ mm, $O_{95} < 0,30$ mm	Keine Beschränkung hinsichtlich Geotextil und Bodenart
DR (1988)	$w \leq d_{50}$; $w \approx O_{90}$	Abhängig von C_u
Fischer et al. (1990)	$O_{50} / d_{85} \leq 0,8$ $O_{50} / d_{15} \leq 1,8 - 7,0$ $O_{50} / d_{50} \leq 0,8 - 2,0$	Abgeleitet von der Porengrößenverteilung des Geotextils, abhängig von C_u des Bodens
entnommen aus Koerner (1994) nach Christopher/Fischer (1991+1992), ausgenommen DR (1988)		

Tab. 2.4: Ausgewählte Kriterien zum Nachweis der mechanischen Filterwirksamkeit

Autor / Quelle	Kriterium	Bemerkungen
z. B. Calhoun (1972) Schober & Teindl (1979) Wates (1980) Haliburton et al. (1982) Carroll (1983) Christopher & Holtz (1985)	$k_F \geq k_S$	Gleichmäßige stationäre Strömung bei unkritischen Anwendungsfällen und filtertechnisch unproblematischen Böden
z. B. Carroll (1983) Christopher & Holtz (1985)	$k_F \geq 10 k_S$	Anspruchsvolle Anwendungsfälle und filtertechnisch problematische Böden oder schwierige hydraulische Verhältnisse
Giroud (1982)	$k_F \geq k_S$	Kein Sicherheitsfaktor im Ansatz berücksichtigt
DR (1988)	$w \leq d_{50}$; $w \approx O_{90}$	Abhängig von C_u
nach Christopher/Fischer (1991+1992) in Christopher et al. (1992), ausgenommen DR (1988)		

Tab. 2.5: Ausgewählte Kriterien zum Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit

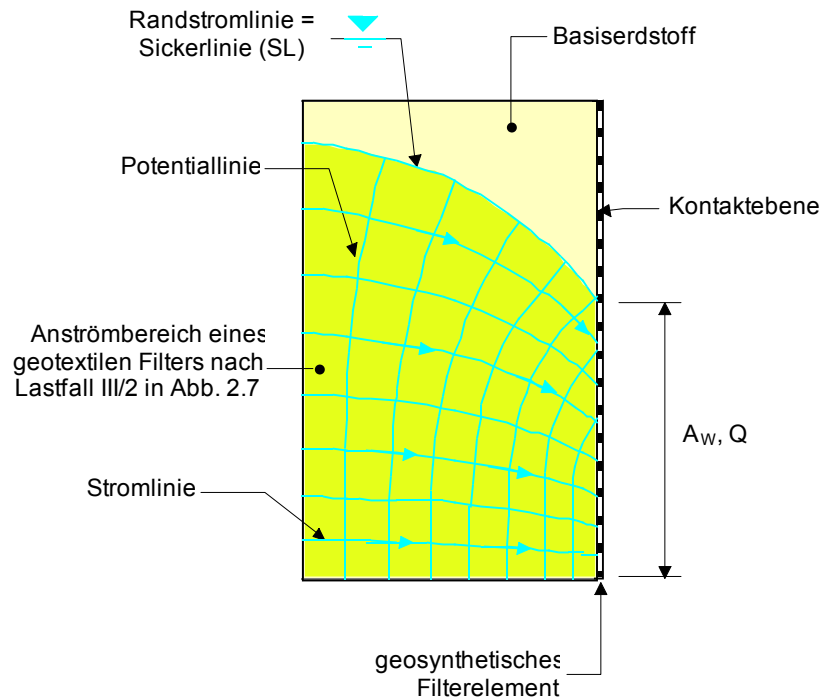


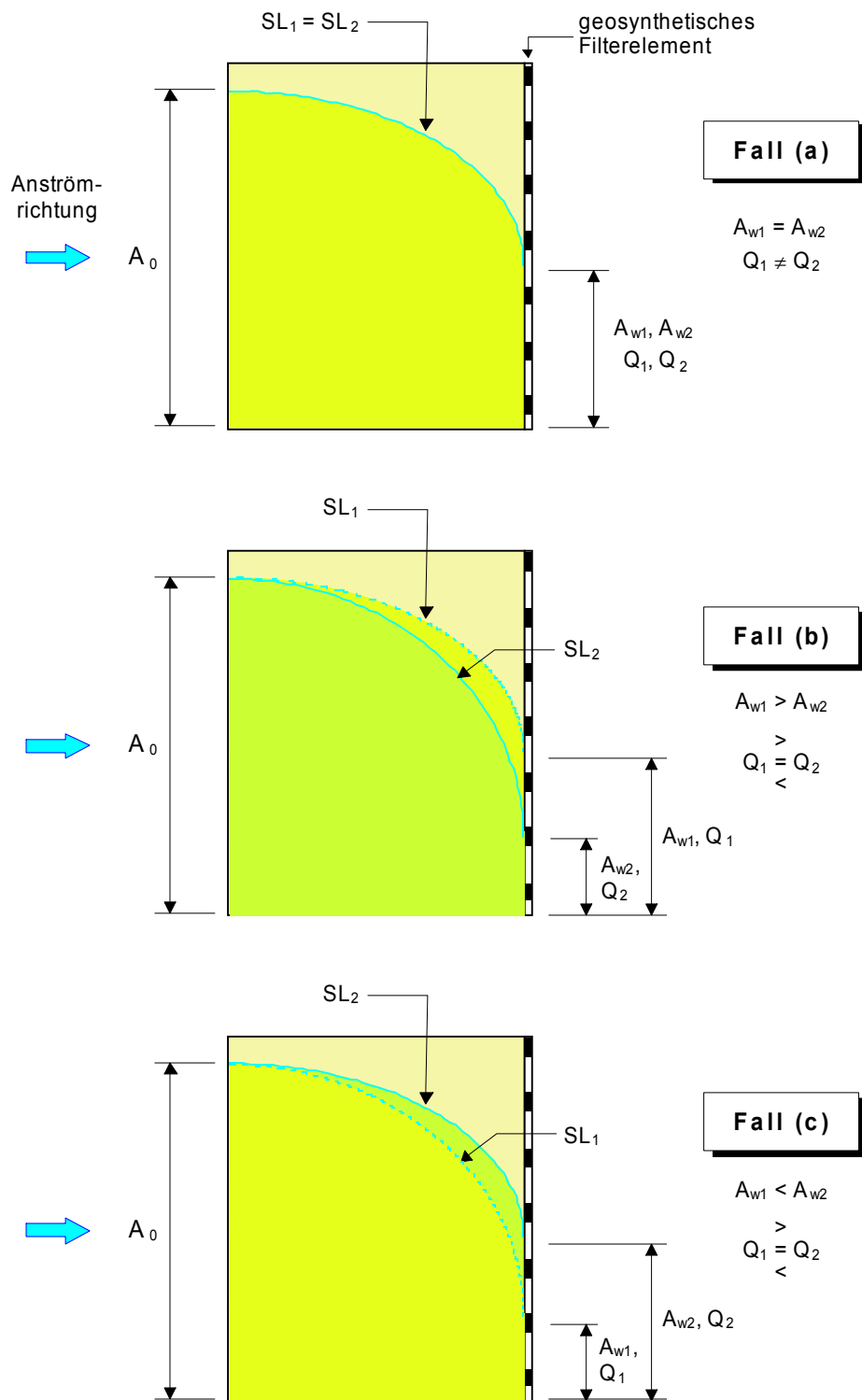
Abb. 3.1: Modellierung des Wasserdurchlässigkeitsverhaltens eines Geotextil-Boden-Systems mittels Strom- und Potentialliniennetz

2.4 ANALYSE VON SCHADENSFÄLLEN

Während Untersuchungen zum Filterverhalten von Geotextilien unter Laborbedingungen oder Ausgrabungen sich zumeist mit der Abbildung und Dokumentation von Randbedingungen befassen, die die Funktionstüchtigkeit eines geotextilen Filters gewährleisten, ist der zu erwartende Erkenntniszuwachs aus der Analyse funktionsuntüchtiger Systeme ungleich größer. Vor dem Hintergrund dieser Tatsache soll den im folgenden näher vorgestellten Schadensfällen und ihrer Ursachen in Koerner/Koerner (1995), Heerten (1995) und Giroud (1995a) deshalb die Funktion einer Datenquelle zugewiesen werden.

Koerner/Koerner [0] analysieren die Ursache funktionsuntüchtiger Entwässerungssysteme an amerikanischen Fernverkehrsstraßen (Highways) die unter Verwendung vorgefertigter Geocomposite Edge Drains (PGED = kombinierte Filter-/Drainagesysteme aus Geokunststoff-Verbundkonstruktionen) hergestellt wurden. Von den insgesamt 41 entnommenen PGED-Proben weisen 14 Systeme eine nicht ausreichende Funktionsfähigkeit auf.

Im Ergebnis ihrer Analysen führen die Autoren das Versagen von 8 der 14 Systeme auf ein mangelndes Bodenrückhaltevermögen des Vliesstoffes in Verbindung mit fehlendem vollflächigen Kontakt -Bild a) in Abb. 2.18- zwischen den PGED-Bauelementen und dem ungebundenen mineralischen Oberbau zurück -mineralisches Tragschichtmaterial mit Schluff- und Feinsandanteilen und geringen plastischen Eigenschaften $I_p < 13\%$ -. Zusätzlich begünstigt wurde das Systemversagen nach Auffassung der Autoren durch die dynamischen Einwirkungen des Straßenverkehrs. Zur Vermeidung der Schäden empfehlen Koerner/Koerner [0] eine Veränderung der PGED-Konstruktionen analog Bild b) in Abb. 2.18 und machen Angaben zur erforderlichen Kornverteilung des Tragschichtmaterials, die vornehmlich in einer Begrenzung des Anteils abschlämmbarer Bestandteile bestehen.



SL₁ : Lage der Sickerlinie für Kontaktverhältnisse laut Bemessungsvorgabe

SL₂ : Lage der Sickerlinie für Kontaktverhältnisse in-situ

Abb. 3.2: Mögliche Auswirkungen von Kontaktverhältnissen in-situ im Modell der Durchströmungswiderstände

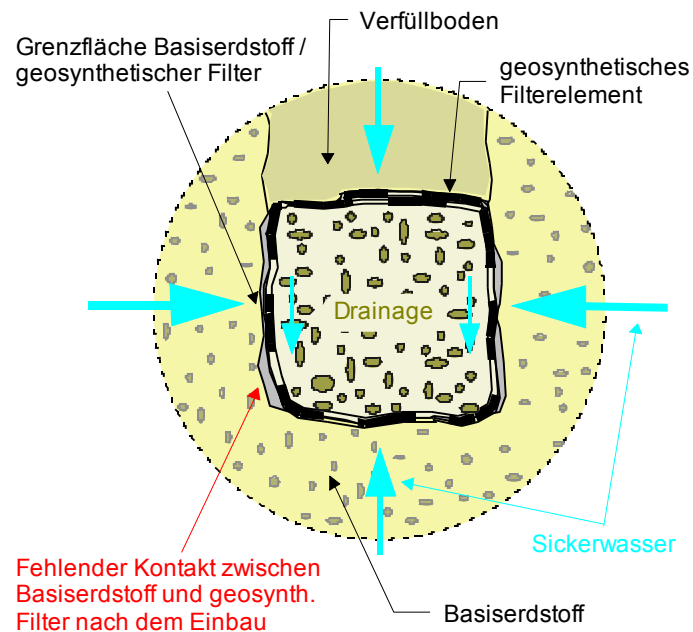


Abb. 3.3: Detailschnitt zur Kontaktsituation entlang der Grenzfläche Basiserdstoff/Geotextil eines Grabenfilters

Heerten (1995) [0] und Giroud (1995a) [0] stellen in Giroud [0] Schadensfälle im Zusammenhang mit der Anwendung geotextiler Filter bei Erosions- und Böschungsschutzmaßnahmen im Wasserbau vor.

Bei den von Heerten [0] behandelten 3 Deckwerkskonstruktionen zeigte sich mit Ausnahme von Deckwerk A nach etwa 7 Monaten das in Abb. 2.19 dargestellte Schadensbild, dessen Ursache in Fallrichtung der Deckwerksböschung gerichteter Bodenumlagerungsvorgänge zu sehen ist.

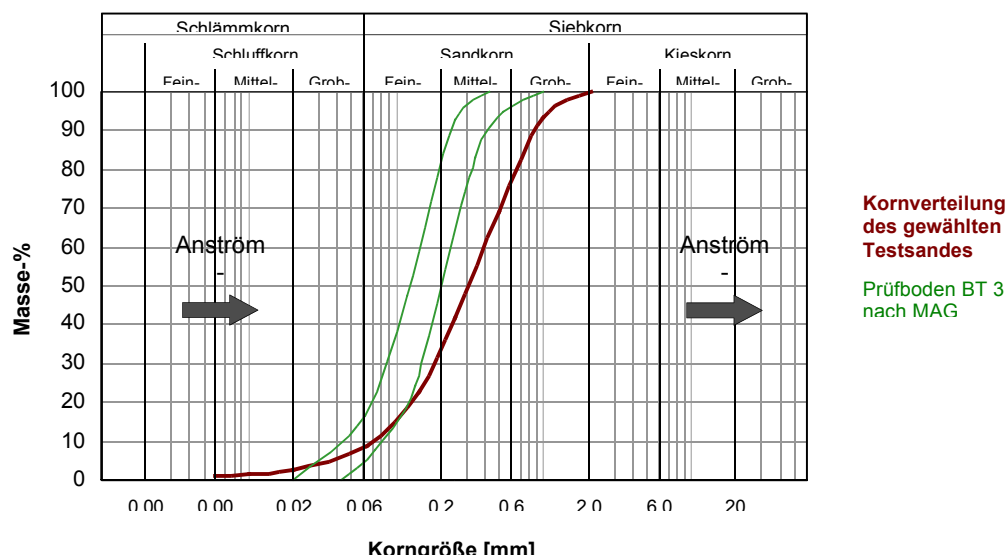
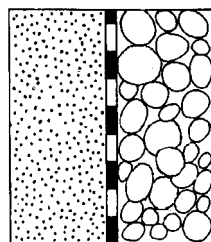


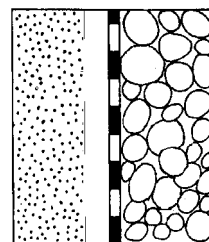
Abb. 4.1: Kornverteilung des Testsandes im Vergleich zu Prüfboden BT 3 nach MAG [0]

Vollflächiger Kontakt



Grenzfall 1

Hohlraum in der Grenzfläche



Grenzfall 2

Abb. 4.2: Systemdarstellung von Grenzfällen unterschiedlicher Kontaktsituationen

Abbildung 2.18 ausgelagert

Prüfling	Grundwerkstoff, Verfestigungsart	Flächen- gewicht [g/m ²]	Dicke (2 kN/m ²) [mm]	Öffnungsweite O _{90, w} [μm]	Wasser- durchlässigkeit k _v (2 kN/m ²) [m/s]
NP 1	PP, mechanisch vernadelt	180	3,00	140 (Franzius)	9,8 x 10 ⁻³
NP 2	PP, mechanisch vernadelt	300	3,30	200 (E 60500 T 6)	6,0 x 10 ⁻³
NP 3	PP, mechanisch vernadelt	750	7,00	560 (E 60500 T 6)	5,0 x 10 ⁻³
HB 1	PP, thermisch verfestigt	90	0,40	240 (Franzius)	1,5 x 10 ⁻³ (EMPA)
HB 2	30 % PE, 70 % PP, thermisch verfestigt	120	0,80	170 (E 60500 T 6)	2,1 x 10 ⁻³
HB 3	PP, thermisch verfestigt	136	0,45	140 (Franzius)	0,9 x 10 ⁻³ (EMPA)

Tab. 4.1: Kenndaten und Parameter der beprobten geosynthetischen Filterelemente

Abb. 2.19: Momentaufnahmen der Deckwerkskonstruktionen A - C (Heerten [0])

Während die Stabilisierung der Kontaktzone zwischen Basiserdstoff und geotextilem Filter grundsätzlich die Forderung des Intimate Contact beider Systemkomponenten impliziert, konnte diese Randbedingung bei den Deckwerken B und C nicht gewährleistet werden. Infolge hydraulischer Beanspruchungen, insbesondere auch böschungs- und somit filterparalleler Strömungen, setzten Umlagerungs- und Erosionsprozesse transportgefährdeter Kornfraktionen des Basiserdstoffes -Boden mit hoher Einzelkornmobilität nach Tab. 2.3- in Böschungsfallrichtung analog Abb. 2.20 ein.

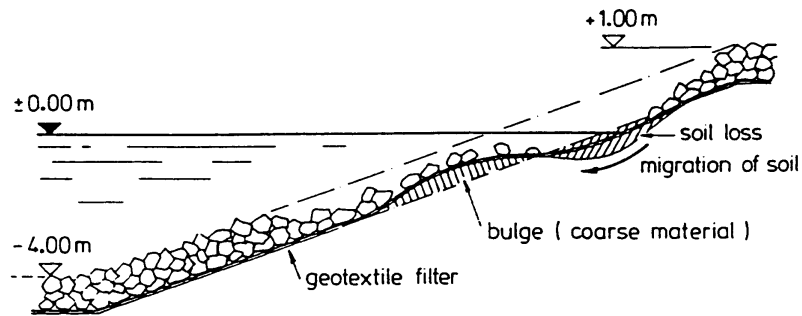


Abb. 2.20: Versagensmechanismus eines Deckwerkes infolge von Bodenumlagerungsvorgängen in Böschungsfallrichtung (Heerten [0])

Der beschriebene Versagensmechanismus trat nach [0] bei Deckwerk A nicht auf, weil durch die Struktur des eingesetzten Vliesstoffes die Stabilisierung der Kontaktzone zwischen Basiserdstoff und geotextilem Filter erzielt wurde. Das eingebaute Geotextil hat weiterhin die Ausbildung eines Sekundärfilters im Anströmbereich begünstigt. Zur Vermeidung künftiger Schäden empfiehlt der Autor die Bemessung geotextiler Filter gemäß DVWK (1989 bzw. 1992) und weist auf die verbesserte Stabilisierungswirkung spezieller geotextiler Verbundstoffe mit Zusatzausrüstungen (Stabilisierungsschichten) hin. Ergänzend schlägt er vor, Aufbau und Geometrie der Deckwerke, wie in Abb. 2.14 dargestellt, zu optimieren.

Das Versagen eines Deckwerkes mit ähnlich gelagerter Schadensursache, fehlendem Intimate Contact, beschreibt Giroud [0]. Der geotextile Filter unterhalb der Schüttsteinlage des Deckwerkes war aufgrund von Faltenbildungen nicht in vollflächigem Kontakt mit dem Basiserdstoff des Auflagers. Infolge hydraulischer Beanspruchung durch das Sickerwasser im böschungsseitigen Anströmbereich wurde der Hohlraum zwischen geotextilem Filter und Basiserdstoff mit feinen Bodenpartikeln des Basiserdstoffes verfüllt. Hierdurch entstandene Zonen geringer Durchlässigkeit gaben eingeleitete Strömungsbelastungen des Sickerwassers in Form von abhebenden Kräften auf die Schüttsteinlage weiter. Der bei Wasserspiegeländerungen entstandene Porenwasserüberdruck in der Böschung konnte nicht ausreichend schnell über den geotextilen Filter abgebaut werden und führte zum Versagen des Deckwerkes bzw. der Böschung.

2.5 DEFIZITE AKTUELLER BETRACHTUNGSWEISEN

Wie schon die Analyse der aktuellen Modellierungsansätze hydraulischer Filterbeanspruchungen nach Abb. 2.5 in Kapitel 2.3.3 gezeigt hat, sind die Auswirkungen unterschiedlicher Kontaktsituationen zwischen mineralischen Basiserdstoffen und geotextilen Filterelementen bislang nicht durch Erkenntnisse systematischer Untersuchungen beleg- bzw. erklärbar. In

Verbindung mit den aus der Analyse funktionsuntüchtiger Systeme in Koerner/Koerner [0], Heerten [0] und Giroud [0] gewonnenen Erkenntnissen zeigt sich, daß die bisherige Untersuchungspraxis von Filterbelastungen analog der Lastfälle I und II nach Abb. 2.5 entscheidende Defizite in der Abbildung praxisgerechter Bedingungen von Filtersystemen mit geosynthetischen Filterelementen birgt und nur spezielle Randbedingungen einiger Anwendungsfälle erfassen kann.

Diese Auffassung wird auch von Heerten [0] vertreten. Er bezeichnet Untersuchungseinrichtungen, die das Verhalten geotextiler Filter in Deckwerkskonstruktionen des Wasserbaus mit horizontaler Lage der Grenzfläche Basiserdstoff/Geotextil abbilden, als nicht relevant.

Maßgebender Nachteil ist, daß die für Geotextilien charakteristische Eigenschaft, Hohlräume zu überspannen, weder durch die idealisierten Bedingungen des Lastfalles I oder II noch Lastfall III berücksichtigt wird, im Hinblick auf die Stabilisierung des Basiserdstoffes im Bereich des Wasseraustrittes aber von entscheidender Relevanz ist (Kapitel 2.1). Hierbei ist es in einem ersten Schritt noch unbedeutend, auf welche Ursache diese Hohlräume zurückzuführen sind. Treten diese bei der Anwendung mineralischer Kornfilter auf, ist durch das Nachrutschen des Filtermaterials eine Verfüllung der Hohlräume sichergestellt. Im Gegensatz hierzu kann der im Deckwerk nach Abb. 2.20 durch die Umlagerung und Erosion des Basiserdstoffes entstandene Hohlraum nicht durch das Nachrutschen der Lagen oberhalb des Basiserdstoffes geschlossen werden; er wird aufgrund des textiltechnischen Verbundes der Fasern des Vliesstoffes überspannt und begünstigt das Fortschreiten der Versagensmechanismen.

Ausschlaggebend für die von Giroud [0] geschilderten Situationen mangelhafter Kontaktverhältnisse in der Grenzfläche Basiserdstoff/Geotextil ist die durch eine unzureichende vollflächige Filterauflast begünstigte Faltenbildung des Vliesstoffes während des Einbaus.

Das Versagen aller hier vorgestellten Systeme ist zusammengefaßt vorrangig auf eine nicht geokunststoffgerechte Bauweise und Sorgfalt bei der Bauausführung zurückzuführen, setzt man voraus, daß Planungsfehler nicht vorgelegen haben. Inhalt zukünftiger Untersuchungsprogramme muß es deshalb sein, über die „idealisierten“ Bedingungen der Lastfälle I bis III hinaus einen Erkenntniszuwachs „geokunststoffspezifischer Mechanismen“ im Zusammenhang mit der Funktion des Filterns zu erzielen. Dies gilt im besonderen für Einflüsse und Auswirkungen von Kontaktphänomenen auf die sichere Planung, Auswahl, Bemessung und praktische Herstellung von Filtersystemen mit Geotextilien.

3 ENTWICKLUNG EINES MODIFIZIERTEN MODELLS ZUR FUNKTIONSWEISE VON FILTERSYSTEMEN

3.1 INTIMATE CONTACT ALS BEMESSUNGSVORGABE

Im Zusammenhang mit der Definition der Aufgabe eines Filterelementes (Kapitel 2.1) nimmt der vollflächige Kontakt -Intimate Contact- zwischen mineralischem Basiserdstoff und geosynthetischem Filterelement eine zentrale Stellung ein; d. h.:

Die Gewährleistung des Schutzes eines mineralischen Basiserdstoffes vor hydraulisch bedingten Verformungen (Umlagerung und/oder Transport von Bodenteilchen) durch das Sicker- und/oder Grundwasser im Bereich des Wasseraustrittes ist nur dann in vollem Umfang sichergestellt, wenn durch den vollflächigen Kontakt zwischen

-

Basiserdstoff und geosynthetischem Filter eine hohlraumfreie Grenzfläche garantiert wird.

Kann diese Bedingung nicht vollständig auf die Kontaktverhältnisse von Filtersystemen in-situ übertragen werden, ist eine Umlagerung der Kornstruktur des Basiserdstoffes im Bereich der Grenzfläche durch Verfüllvorgänge die Folge. Die Stabilisierung der Grenzfläche zwischen Geotextil und Basiserdstoff und die möglichst druckverlustfreie Weiterleitung des Sickerwassers durch den Filter können bis hin zum Systemversagen erschwert werden (siehe Kapitel 2.4 und Abschnitt 4.1 in MAG (1993a)).

Die Bemessung und Auswahl von Filtersystemen mit Geotextilien nach den einschlägigen Regelwerken setzt, neben anderen Bedingungen, die Gewährleistung des Intimate Contact voraus; z. B.:

„Für das Aufbauen eines stabilen Boden-/Filtersystems mit ausreichender Wasserdurchlässigkeit ist ein inniger, hohlraumfreier Kontakt des Geotextils zum Boden erforderlich.“ (Abschnitt 5.2.0 in Wilmers (1994))

„Die Filter- und Deckschichtbauweise muß besonders auf Böschungen unter den möglichen hydraulischen Einwirkungen eine stabile Grenzschicht zwischen dem Geotextil und dem Boden gewährleisten, um Bodenumlagerungen auszuschließen. Das Geotextil muß daher einen vollflächigen Kontakt mit dem Planum erhalten.“ (Abschnitt 4.1 in MAG (1993a))

„An unter Wasser profilierten Böschungen können durch hydraulische Einwirkungen schon vor dem Aufbringen der Filterschicht Erosionszonen auftreten. Auswaschungen müssen vor dem Einbau des Geotextils mit rolligem Material mit ausreichender Dicke abgedeckt bzw. ausgekleidet werden.“ (Abschnitt 3.2.1 in DVWK (1992))

Auch die in Regelwerken enthaltenen Systemdarstellungen von Filteranwendungen mit Geotextilien geben den Verlauf der Grenzfläche zwischen mineralischem Basiserdstoff und geosynthetischem Filter mit vollflächigem, hohlraumfreiem Kontakt wieder (vgl. Abb. 2.1 und Abb. 2.5). Im Minimum ist die Forderung des Intimate Contact indirekt im Anspruch der zuverlässigen Gewährleistung der Aufgabe des Filterelementes bei Beachtung der jeweiligen Angaben und Randbedingungen enthalten.

3.2 MODELL DER DURCHSTRÖMUNGSWIDERSTÄNDE

3.2.1 STRUKTURBETRACHTUNG

Die Modellierung der Durchströmung eines porösen, durchlässigen Mediums mit Wasser erfordert eine differenzierte Betrachtung der Struktur dieses Stoffes. Im Falle bodenmechanischer Filter werden an die eingesetzten Materialien, strukturunabhängig, grundsätzlich die gleichen Leistungsanforderungen gestellt: Gewährleistung der mechanischen und der hydraulischen Filterwirksamkeit (Kapitel 2.3.1).

Mineralischer Kornfilter

- * Ein mineralischer Kornfilter hat prinzipiell eine dem Basiserdstoff vergleichbare Struktur; Korn- und Porengrößen sind größer als diejenigen des Basiserdstoffes (Porenanteil bei Kiesen und Sanden etwa zwischen 25 - 40 %, bei Schluffen und Tonen etwa 35 - 60 %).
- * Die Einbaudicke des Filters liegt, technologisch bedingt, im Dezimeterbereich (Einbaudicke d zumeist ≥ 20 cm).

- * Die technologisch bedingte Einbaudicke des Filtermaterials impliziert auch die Anwendung eines mineralischen Mischfilters zur Wasserableitung (Drainagefunktion) in der Ebene.
- * Die Kornstruktur -nichtbindiger Boden ohne inneren Verbund- gewährleistet im Zuge des Einbaus überall und sofort unmittelbaren Kontakt zwischen Basiserdstoff und Filterkörnung.

Der Bemessungsalgorithmus der für den Filter erforderlichen Korngröße zur Gewährleistung der mechanischen Filterwirksamkeit (Verhinderung einer Kontakterosion) erfolgt unter Bezug auf die mittlere Korngröße sowie den vorhandenen Ungleichförmigkeitsgrad von Basiserdstoff und Filter oder das Suffosionskorn des Basiserdstoffes. Bei bindigen Böden ist die zu erwartende Elementaraggregatgröße entscheidend.

Ein separater Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit erfolgt in aller Regel nicht bzw. die ausreichende Wasserdurchlässigkeit wird als gewährleistet vorausgesetzt.

Geosynthetische Filterelemente

- * Im Vergleich zu Kornfiltern unterscheidet sich die Struktur geosynthetischer Filterelemente grundsätzlich von der mineralischer Basiserdstoffe.
- * Der Porenanteil am Gesamtvolumen des Filtermaterials ist wesentlich größer (Porenanteil bei Vliesstoffen etwa zwischen 80 und 92 %; in [0]); die Porenraumgeometrie ergibt sich aus der Faserstruktur in Verbindung mit dem jeweiligen Herstellungsverfahren.
- * Die Einbaudicke beträgt in der Regel nur wenige Millimeter.
- * Der Durchströmungsmechanismus eines geosynthetischen Filters findet vorrangig in Form eines Wasserdurchtrittes statt, weil eine Wasserableitung in der Ebene aufgrund der vergleichsweise geringen Dicke und des dadurch fehlenden Porenvolumens nicht immer möglich ist. Die Wasserableitung wird in aller Regel einem weiteren Konstruktionselement zugewiesen. Hierfür kommen sowohl mineralische Kornstrukturen als auch geosynthetische Dränelemente (Abb. 2.2) in Frage.
- * Durch den textiltechnischen Verbund der Fasern und einer daraus resultierenden Steifigkeit ergibt sich im Zuge des Einbaus nicht in allen Fällen überall und sofort ein direkter Kontakt zwischen Filterelement und Basiserdstoff.

Die Bemessung der mechanischen Filterwirksamkeit eines Geotextils erfolgt durch einen Vergleich der Kornverteilung des Basiserdstoffes mit einer als wirksam definierten Porengröße des geosynthetischen Filters.

Zur Gewährleistung der hydraulischen Filterwirksamkeit wird ein erforderlicher „Abstand“ zwischen der Durchlässigkeit des Basiserdstoffes und der Durchlässigkeit des Geotextils nachgewiesen (siehe hierzu Tab. 2.5) bzw. die Durchlässigkeit des fabrikneuen Geotextils um die zu erwartende Durchlässigkeitsabnahme infolge Bodenkontakt abgemindert (siehe auch Abb. 2.15 und Abb. 2.16). Des weiteren besteht die Möglichkeit, die Struktur des Geotextils durch eine minimal erforderliche Öffnungsweite zu abstrahieren; z. B. [0].

3.2.2 SYSTEMVERHALTEN

Die Abbildung des Systemverhaltens von Filterkonstruktionen im Modell basiert maßgeblich auf der Beschreibung bzw. Prognose der Entwicklung des Wasserdurchlässigkeitsverhaltens während der funktionellen Gebrauchsphase (Abb. 2.9).

Hierbei ergibt sich die Wasserdurchlässigkeit eines mineralischen Kornfilters als Durchströmungswiderstand bezogen auf eine endliche Dicke. Sie wird ausgedrückt durch den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k , dessen Größe durch

- * Korn- bzw. Porengröße,
- * Kornform,
- * Porenanteil und den
- * Sättigungsgrad des Porenraumes

bestimmt wird. Der Übergang von Basiserdstoff zu Kornfilter ist mit dem Widerstand einer Rohrerweiterung vergleichbar (Vergrößerung des Stromröhrendurchmessers). Infolge der Erweiterung des Stromröhrendurchmessers wird der laminare Strömungszustand in der Regel beibehalten, der Strömungswiderstand ist praktisch vernachlässigbar Batereau/Weiss/Baumbusch (1996). Wittmann (1980) und anderen können Angaben zu Systembedingungen turbulenter Strömungsverhältnisse entnommen werden.

Bei geosynthetischen Filterelementen wird die Wasserdurchlässigkeit, ebenso wie für mineralische Kornfilter, als Durchströmungswiderstand bezogen auf einen annähernd homogenen Körper endlicher Dicke betrachtet. Im Hinblick auf die filtertechnischen Eigenschaften von Geotextilien sind über die Kompressibilität der textilen Materialien hinaus weitere Besonderheiten zu beachten:

- * Geosynthetische Filterstrukturen haben eine aus praktischer Sicht im Sinne der Bodenmechanik vergleichsweise geringe Dicke, die sich aus einem vorrangig ebenflächigen Fasergefüge ergibt.
- * Die im Vergleich zu mineralischen Korngefügen (Kugelstruktur) grundsätzlich andere Struktur geosynthetischer Materialien (textiltechnisch verbundene Fasern) führt dazu, daß sich Bodenporen in der Kontaktzone zwischen Basiserdstoff und Filter nach Größe und Wirkung derart verändern können, daß sie teilweise vollkommen geschlossen werden und/oder sich teilweise vergrößern.
- * Das geosynthetische Filtermaterial ist in Abhängigkeit zu seinen physikalischen Eigenschaften und der Dicke teilweise stark verformbar und paßt sich bei Belastung der Oberflächenstruktur des mineralischen Basiserdstoffes unterschiedlich an. Die Zusammenrückungen des Filtermaterials sind lokal veränderlich.
- * Durch die Art der Änderung der Stromröhrengeometrie in der Kontaktzone werden Kornab- und -anlagerungsprozesse auf andere Art ausgelöst als beim Übergang von einer feinkörnigen zu einer grobkörnigen mineralischen Struktur. Ursachen der Änderung der Stromröhrengeometrie sind einerseits die Verformungen des geosynthetischen Filterelementes im eingebauten Zustand und andererseits die Oberflächenstruktur in der Kontaktzone.
- * Im Bereich ohne unmittelbaren Kontakt zwischen Basiserdstoff und geosynthetischem Filter kann der Zustand des Intimate Contact erst durch die hydraulischen Kräfte des Sickerwassers oder eine Änderung der Spannungsverhältnisse bewirkt werden. Es kommt zu einem hydraulisch und/oder mechanisch bedingten Einbruch des Basiserdstoffes in den vorhandenen Hohlraum (Verfüllungsprozeß).
- * Im Zuge des Verfüllungsprozesses des Hohlraumes kann es zu Umlagerungen in der Bodenstruktur bzw. einer speziellen Kontaktsituation mit dem geosynthetischen Filterelement kommen. Werden die Hohlräume durch hydraulische Einflüsse des Sicker- und/oder Grundwasserstromes verfüllt, können die Poren des geosynthetischen Filters

blockiert oder verstopft werden. Unter entsprechenden Randbedingungen können sich aber auch Bereiche erhöhter Durchlässigkeit in der Kontaktebene einstellen.

Die differenzierte Betrachtung der Wirkungsweise geosynthetischer Filter gegenüber mineralischen Kornfiltern verdeutlicht, daß das Modell der Durchlässigkeit mineralischer Strukturen nicht ohne weiteres auf die Wirkungsweise geosynthetischer Filtermaterialien übertragbar ist (vgl. auch Strukturbetrachtung Abschnitt 3.2.1).

Das Wasserdurchlässigkeitsverhalten eines geosynthetischen Filterelementes im eingebauten Zustand leitet sich bei exakter Betrachtung aus mehreren, sehr unterschiedlichen Einzeldurchlässigkeiten bzw. Einzelwiderständen (Abb. 3.1) her und stellt einen Summenparameter dar. Als Einzelwiderstände sind relevant:

- * Der Durchströmungswiderstand im Basiserdstoff unmittelbar vor der Kontaktzone. Dieser Widerstand kann durch Kolmationsvorgänge vergrößert oder durch Ausspülungen (rückwärtiger Filteraufbau) verringert werden (Abb. 2.10).
- * Der Eintrittswiderstand des Sickerwassers aus dem Basiserdstoff in den geosynthetischen Filter. Hierbei handelt es sich um einen örtlichen Widerstand ohne meßbare Strömungsphase. Die Größe des Widerstandes wird ausschließlich durch die reine Kontaktsituation bestimmt.
- * Der Durchströmungswiderstand des geosynthetischen Filterelementes selbst, z. B. Widerstand des Geotextils gegenüber der Benetzung mit Wasser und Reibungsverluste infolge der Durchströmung der Faserstruktur (siehe auch Filtereinlaufzeit in Abschnitt 2.3.2).

Zur Abbildung der Einflüsse vorgenannter Durchströmungswiderstände auf das Systemverhalten einer Filterkonstruktion kann das aus der Bodenmechanik bekannte Verfahren der Modellierung von Durchsickerungs- und Durchströmungsvorgängen mittels Strom- und Potentialliniennetzen (Abb. 3.1) herangezogen werden.

Entscheidender Vorteil dieser Methode zur Modellierung der geokunststoffspezifischen Widerstandsgrößen ist, daß eine separate Betrachtung der Einzelanteile des Summenparameters entfallen kann. Voraussetzung hierfür ist, daß die Randbedingungen des modellierten Geotextil-Boden-Systems eine freie Ausbildung der Sickerlinie (=Randstromlinie) ermöglichen (Abb. 3.1).

Ohne in einem ersten Schritt auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert des mineralischen Basiserdstoffes zurückzugreifen, besteht die Möglichkeit, die Widerstandsverhältnisse im System über die Wasserdurchflußrate, die angeströmte Fläche des geosynthetischen Filters und die hydraulischen Gefälleverhältnisse zu quantifizieren. Des weiteren kann der Verlauf der Randstromlinie (=Sickerlinie) qualitativ beurteilt werden. Die Verteilung der Durchflußgeschwindigkeit vor dem geosynthetischen Filterelement ergibt sich in einem zweiten Schritt mit dem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert des Basiserdstoffes und dem hydraulischen Gradienten nach (Gl. 2.1).

Die Auswirkungen veränderter Bedingungen auf die Durchströmungswiderstände innerhalb des Filtersystems können über die Konstruktion eines neuen Strömungs- und Potentialliniennetzes beurteilt werden. Unter der Bezeichnung „veränderte Bedingungen“ sollen an dieser Stelle Veränderungen einer oder mehrerer Einzelwiderstände des Summenparameters der Durchströmungswiderstände verstanden werden.

3.3 KONTAKTVERHÄLTNISSE IN-SITU UND ABBILDUNG IM MODELL

Die aus der Analyse von Schadensfällen in Abschnitt 2.4 gewonnenen Erkenntnisse und die Betrachtung maßgebender hydraulischer Filterbeanspruchungen in Abb. 2.5 verdeutlichen, daß die Bemessungsvorgabe „Intimate Contact“ zwischen mineralischem Basiserdstoff und geosynthetischem Filterelement im Hinblick auf die Kontaktsituation in-situ differenziert zu bewerten ist. Abweichungen vom planmäßigen Ideal-Zustand des Intimate Contact, wie beispielsweise in Abb. 2.1 und Abb. 2.5 dargestellt, können demnach durch

- * maßgeblich konstruktionsbedingte und/oder
- * vorrangig technologisch bedingte Ursachen

hervorgerufen werden.

Mit dem Kriterium maßgeblich konstruktionsbedingte Ursachen sollen Abweichungen vom planmäßigen Soll-Zustand mit der Folge einer Einschränkung oder dem Verlust der Filterwirksamkeit wie beispielsweise in den von Heerten und Giroud in [0] vorgestellten Schadensfällen zusammengefaßt werden. Das Versagen dieser Konstruktionen wurde wesentlich durch die unzureichende Stabilisierung der Kornstruktur des Basiserdstoffes in der Grenzfläche beeinflußt.

Des weiteren wirkte sich die jeweilige Auflastsituation in Abhängigkeit zu Größe und Art der hydraulischen Beanspruchung des Filtersystems nachhaltig negativ aus und begünstigte zusätzlich das Auftreten von Bodenumlagerungsvorgängen in der Kontaktzone.

Das Kriterium der vorrangig technologisch bedingten Ursachen unzulässiger Hohlräume resultiert aus der bautechnisch bedingten Problematik im Zuge der Herstellung einer ideal ebenen, hohlraumfreien Auflagerfläche. Wie unter Abschnitt 2.4 erläutert, führen Koerner/Koerner (1995) die unzureichende Kontaktsituation der PGED-Elemente als Ursache des Systemversagens auf das Nachbrechen größerer Kornfraktionen oder ganzer Korngruppen des mineralischen Tragschichtmaterials bei der Herstellung des Einstellgrabens zurück (Verfüllvorgänge von Hohlräumen). In Verbindung mit der hohen hydraulischen Beanspruchung des Entwässerungssystems während der Gebrauchsphase lag eine im Zuge der Auswahl und Bemessung nicht erfaßte Situation vor.

Auch in MAG (1993a) wird im Rahmen der Anforderungen an die Materialeigenschaften von Geotextilien für Deckwerkskonstruktionen an Wasserstraßen die Problematik möglicher Hohlräume in der Auflagerfläche behandelt. Abschnitt 5.3.1 vorgenannten Regelwerkes ist zu entnehmen: Geotextilien müssen so flexibel und dehnfähig sein, daß sie sich den nicht vermeidbaren Bodenunebenheiten des Planums unter Deckschichtauflast vollflächig anpassen ohne ihre Filterwirksamkeit zu verlieren.

Hieraus folgernd ergibt sich die Feststellung, daß die Gewährleistung optimaler Kontaktverhältnisse unter in-situ Bedingungen als grundsätzlich problematisch einzustufen ist und spezielle Anforderungen an die Eigenschaften der verwendeten geosynthetischen Filterelemente und/oder die Beschaffenheit der Auflagerfläche stellt.

Mit Grundlage der Aufgabe eines Filters im bodenmechanischen Sinne und den zentralen Anforderungen zur Gewährleistung der mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit während der Gebrauchsphase ist nach derzeitigem Kenntnisstand davon auszugehen, daß

- * die Stabilisierung der Kornstruktur des Basiserdstoffes
in der Kontaktzone ([0], [0], [0])

- * das Bodenrückhaltevermögen ([0]) und
- * das Wasserdurchlässigkeitsverhalten ([0], [0])

von Filterkonstruktionen mit Geotextilien maßgeblich durch die Kontaktverhältnisse in-situ beeinflusst werden können.

Die Einflüsse von im Vergleich zum Bemessungsansatz veränderten Kontaktverhältnissen in-situ auf das Systemverhalten lassen sich im Modell der Durchströmungswiderstände wie nachfolgend dargestellt abstrahieren (Abb. 3.2).

3.4 PRAKTISCHES KONSTRUKTIONSBEISPIEL

Die im Modell erläuterten Einflüsse unterschiedlicher Kontaktsituationen auf das Systemverhalten können auf eine Vielzahl praktischer Anwendungsfälle übertragen werden. Betrachtet man die in Abb. 2.1 dargestellten charakteristischen Einsatzbereiche geosynthetischer Filterelemente in Form von Rohr-, Graben- und Flächenfiltern, so sind die beschriebenen Kontaktphänomene im besonderen für jene Anwendungsfälle zu erwarten, deren Systembedingungen hydraulische Filterbelastungen vergleichbar Lastfall III/2 in Abb. 2.5 beinhalten.

Als besonders geeignet die Funktionsweisen geosynthetischer Filterelemente und deren Auswirkungen auf das Systemverhalten unter in-situ Bedingungen zu analysieren, ist das Konstruktionsbeispiel eines Grabenfilters einzustufen (Abb. 3.4). Vorgenannte Bauweise wird beispielsweise für Entwässerungsaufgaben im Straßen-, Wasser- oder Dammbau eingesetzt. Aufgrund der Lage der Kontaktflächen und der Richtung der hydraulischen Beanspruchung durch das Sicker- und/oder Grundwasser werden die Verhältnisse des Lastfalles III nach Abb. 2.5 an den Seitenwänden des Systems identisch abgebildet. Darüber hinaus liegen bei aufwärtsgerichteter Anströmung der Grabensohle Bedingungen analog Lastfall II/2 vor. Schichtenfolge und Durchströmungsrichtung des Lastfalles I/2 nach Abb. 2.5, die aus Sicht der beschriebenen Kontaktphänomene von untergeordneter Bedeutung sind, ergeben sich an der Oberseite des Systems.

Der im Bezug auf die Gewährleistung des Intimate Contact unter realen Bedingungen kritische Sachverhalt zur Herstellung einer ideal ebenen und hohlraumfreien Auflagerfläche wird bei Betrachtung des Detailschnittes in Abb. 3.3 gegenwärtig. Während der Verlauf der Kontaktfläche zwischen mineralischem Basiserdstoff und geosynthetischem Filterelement in der Gesamtdarstellung idealisiert in Form eines Linienzuges verläuft, ergeben sich, bedingt durch Struktur und Eigenschaften des Baustoffes Boden, Abweichungen von dieser Idealisierung.

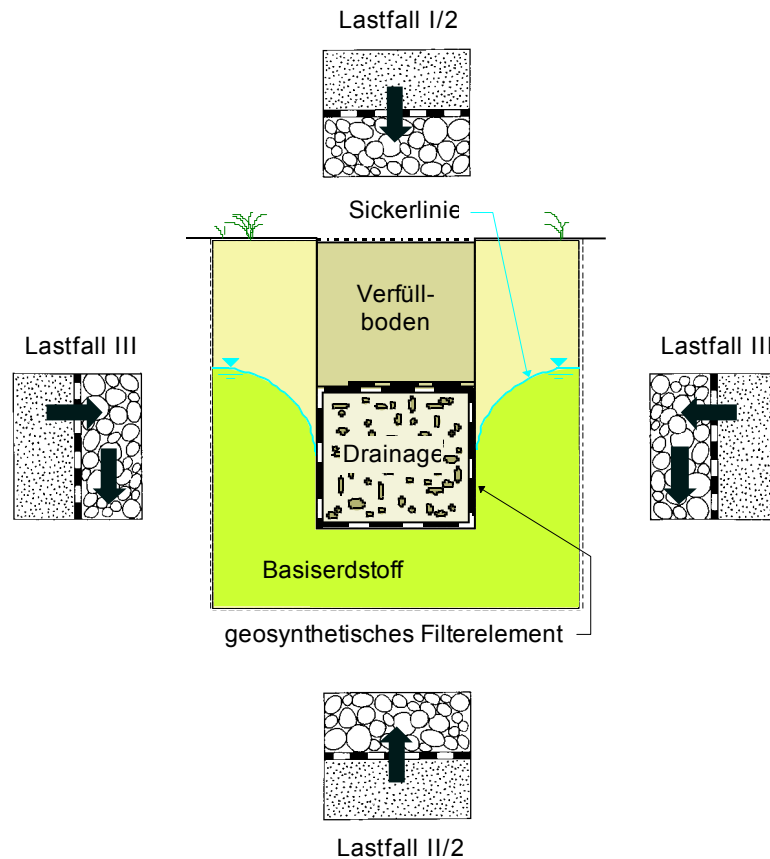


Abb. 3.4: Konstruktionsbeispiel Grabenfilter mit geosynthetischem Filterelement und maßgebenden hydraulischen Filterbeanspruchungen

An der Oberseite und in der Grabensohle der Filterkonstruktion sind mit den unter Abschnitt 2.3.3 erläuterten Bedingungen der Lastfälle I und II auch unter realen Konstellationen vergleichsweise unkritische Kontaktverhältnisse vorhanden, sieht man von der der Gravitation entgegengerichteten Anströmung des Geotextils in der Grabensohle ab.

Abweichungen von der Bemessungsvorgabe des Intimate Contact sind an den Seitenwänden des Grabens vorhanden. Diese sind nach Abschnitt 3.3 den maßgeblich technologisch bedingten Ursachen der Abweichungen vom Ideal-Zustand zuzurechnen.

4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG VON KONTAKTPHÄNOMENEN

4.1 KONZEPTION UND GEOTEXTIL-BODEN-SYSTEME

Die Funktion des Filterns mit Geotextilien betreffend werden durch die Betrachtung möglicher Einflüsse der Kontaktsituation vorrangig zwei Fragestellungen aufgeworfen:

Welche Funktionsweisen und systemimmanenten Mechanismen und Prozesse kennzeichnen das Verhalten von Filterkonstruktionen bei Abweichungen vom Ideal-Zustand des Intimate Contact ?

Durch welche Anforderungen und Annahmen wird dieses Verhalten schon zum Zeitpunkt der Auswahl und Bemessung vorhersag- und beherrschbar ?

Zur Beantwortung dieser zentralen Fragestellungen sind vorzugsweise experimentelle Untersuchungen geeignet, die Kontaktsituationen zwischen mineralischen Basiserdstoffen und Geotextilien in-situ abbilden und die Erfassung aller erforderlichen Daten und Größen hinsichtlich einer Verarbeitung und Interpretation im Modell der Durchströmungswiderstände gestatten. Weitere Erkenntnisse sind von der Untersuchung werkstoffspezifischer Durchströmungswiderstände in Form von Benetzungswiderständen, Wasserdurchtrittsphänomenen etc. (s. a. [0], [0]) zu erwarten. Durch die Anwendung der Beobachtungsmethode zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit von Filtersystemen in Form von Ausgrabungen kann eine weitere wichtige Datenquelle erschlossen werden.

Bezüglich der in Versuchen simulierten unterschiedlichen Kontaktsituationen bieten sich besonders die in der Systemdarstellung nach Abb. 4.2 enthaltenen Grenzfälle,

- | | |
|--------------------|---|
| Grenzfall 1 (GF 1) | Vollflächiger Kontakt zwischen Basiserdstoff und Geotextil im Zuge des Einbaus und |
| Grenzfall 2 (GF 2) | Einstellung des Kontaktes zwischen Basiserdstoff und Geotextil durch hydraulische Beanspruchung infolge Sickerwasserzustrom |

an. Während die Verhältnisse des Grenzfalles 1 unmittelbar vor dem Beginn der Filtereinlaufzeit der maßgebenden hydraulischen Filterbeanspruchung nach Lastfall III/2 in Abb. 2.5 entsprechen -Ideal-Zustand des Intimate Contact-, befindet sich der mineralische Basiserdstoff für die Bedingungen des Grenzfalles 2 nicht im Kontakt mit dem geosynthetischen Filterelement. In der Grenzfläche zwischen Basiserdstoff und Geotextil liegt ein Hohlraum vor, dessen Verfüllung mit dem Basiserdstoff sich erst durch die hydraulische Sickerwasserbeanspruchung und/oder einer Veränderung der Spannungsverhältnisse während der Filtereinlaufzeit einstellt.

Mineralischer Basiserdstoff

Zur Gewährleistung der Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen auf praktische Anwendungsfälle sind besonders jene Erdstoffe zur Durchführung von experimentellen Untersuchungen zu bevorzugen, deren Kornverteilung eine erhöhte Einzelkornmobilität erwarten läßt. (siehe auch Abschnitt 2.4 Analyse von Schadensfällen).

Unter Berücksichtigung der diskutierten Sachverhalte und in Anlehnung an die in [0] enthaltenen Bodentypen BT 1 bis BT 4 wurde als Basiserdstoff ein suffosionssicherer, leicht schluffiger Mittelsand (mS, gs, fs, u') Körnungsbereich B in Tab. 2.3 nach [0], Boden mit hoher Einzelkornmobilität gewählt (Abb. 4.1). Zum Vergleich enthält Abb. 4.1, neben der Kornverteilungskurve des gewählten Testsandes, auch das Körnungsband des Prüfbodens BT 3 nach [0]. Der Testboden wurde als Zwei-Komponenten-Gemisch aus einem Quarzsand 0-1 mm unter Zugabe von Quarzfüller 0-0,09 mm hergestellt. Auf die Möglichkeit, die Kornverteilung des Testbodens innerhalb der Untersuchungsprogramms zu variieren, wurde zugunsten der Beprobung von geotextilen Filtervliesstoffen unterschiedlicher Leistungsdaten verzichtet.

Geosynthetische Filterelemente

Die eingesetzten geosynthetischen Filterelemente sind nach den einschlägigen Vorschriften und Empfehlungen in Abhängigkeit zum vorliegenden Basiserdstoff zu bemessen. Da für die Funktion des Filterns mit Geotextilien in der Praxis zumeist Vliesstoffe eingesetzt werden, sind diese Filtermaterialien für experimentelle Untersuchungen anderen, wie z. B. Geweben oder Maschenwaren, vorzuziehen.

Ferner ist auf einen einheitlichen polymeren Grundwerkstoff der Filtervliesstoffe zur besseren Beurteilung eines eventuellen Auftretens der in [0], [0] beobachteten geokunststoffspezifischen Benetzungsphänomene zu achten.

Aus der Filterbemessung nach DVWK [0] und Wilmers [0] ergeben sich für den Basiserdstoff nach Abb. 4.1 bei hydrostatischer Filterbelastung folgende Anforderungen an die Eigenschaften des geotextilen Filters:

Mechanische Filterwirksamkeit (Abb. 2.17 und Gl. 2.6)

$$0,17 \text{ mm} < \text{gewählt } O_{90, w} < 0,84 \text{ mm}$$

In Anlehnung an den in [0] angegebenen Grenzwert der kleinsten zulässigen wirksamen Öffnungsweite des geotextilen Filters von $0,2 * O_{90, \text{zulässig}} = 0,17 \text{ mm} = \min O_{90}$ lässt sich das in Abb. 4.3 dargestellte Auswahl-schema der für die Untersuchungen gewählten geosynthetischen Filterelemente ableiten. Die Kenndaten der verwendeten Filtervliesstoffe NP 1 bis NP 3 und HB 1 bis HB 3 können Tab. 4.1 entnommen werden.

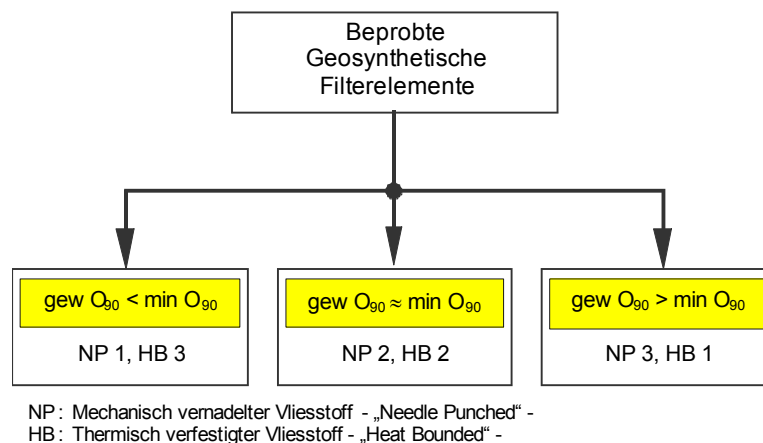


Abb. 4.3: Auswahl-schema der geosynthetischen Prüflinge

Hydraulische Filterwirksamkeit

$$\eta_{G, v} * k_{v, \text{Geotextil}} \geq k_{f, \text{Testsand}} \quad (k_{f, \text{Testsand}} \approx 1 * 10^{-5} \text{ m/s})$$

	HB 1 bis HB 3	NP 1 bis NP 3	
	(Abb. 2.15, Gl. 2.7)	(Abb. 2.16, Gl. 2.7)	(alternativ Gl. 2.8)
1	$3,0 * 10^{-5}$	$8,0 * 10^{-4}$	$2,0 * 10^{-4}$
2	$2,0 * 10^{-5}$	$6,0 * 10^{-5}$	$1,2 * 10^{-4}$
3	$1,0 * 10^{-5}$	$5,0 * 10^{-5}$	$1,0 * 10^{-4}$

Die hydraulische Filterwirksamkeit nach DVWK [0] ist für alle eingesetzten Geotextilien HB 1 bis HB 3 und NP 1 bis NP 3 gewährleistet, auch wenn die Öffnungsweiten der Prüflinge NP 1 und HB 3 unterhalb des nach [0] angegebenen Grenzwertes $O_{90, \text{gewählt}} > 0,2 * O_{90, \text{zulässig}}$ liegen. Weiterhin ergibt sich im Vergleich zu Wilmers [0] nach den Vorgaben in DVWK [0] eine konservativere Beurteilung der hydraulischen Filterwirksamkeit der mechanisch vernadelten Vliesstoffe.

4.2 GROSSVERSUCHE IN DER „WEIMARER ZELLE“

4.2.1 VERSUCHSANLAGE

Die praktische Modellierung der unter Abschnitt 4.1 genannten Grenzfälle 1 und 2 (GF 1 und GF 2 in Abb. 4.2) unterschiedlicher Kontaktsituationen wurde über die Entwicklung einer Versuchsanlage zur Durchführung großmaßstäblicher Laborversuche realisiert. Eine Systemdarstellung der für die Untersuchungen konzipierten „Weimarer Zelle“ ist Abb. 4.4 zu entnehmen. Hauptbestandteile der aus Acrylglas gefertigten Anlage sind die Grundeinheit, bestehend aus der Durchlässigkeitszelle mit speziellen Einbauten, ein Hochbehälter mit Überlaufwehr und Einlaufberuhigung, ein Hochbehälter mit Überlaufwehr und Einlaufberuhigung, ein Sandfang, ein Überlaufbehälter, sowie die zum Betrieb eines geschlossenen Wasserkreislaufes erforderlichen Einrichtungen und die installierte Meßtechnik (Abb. 4.5).

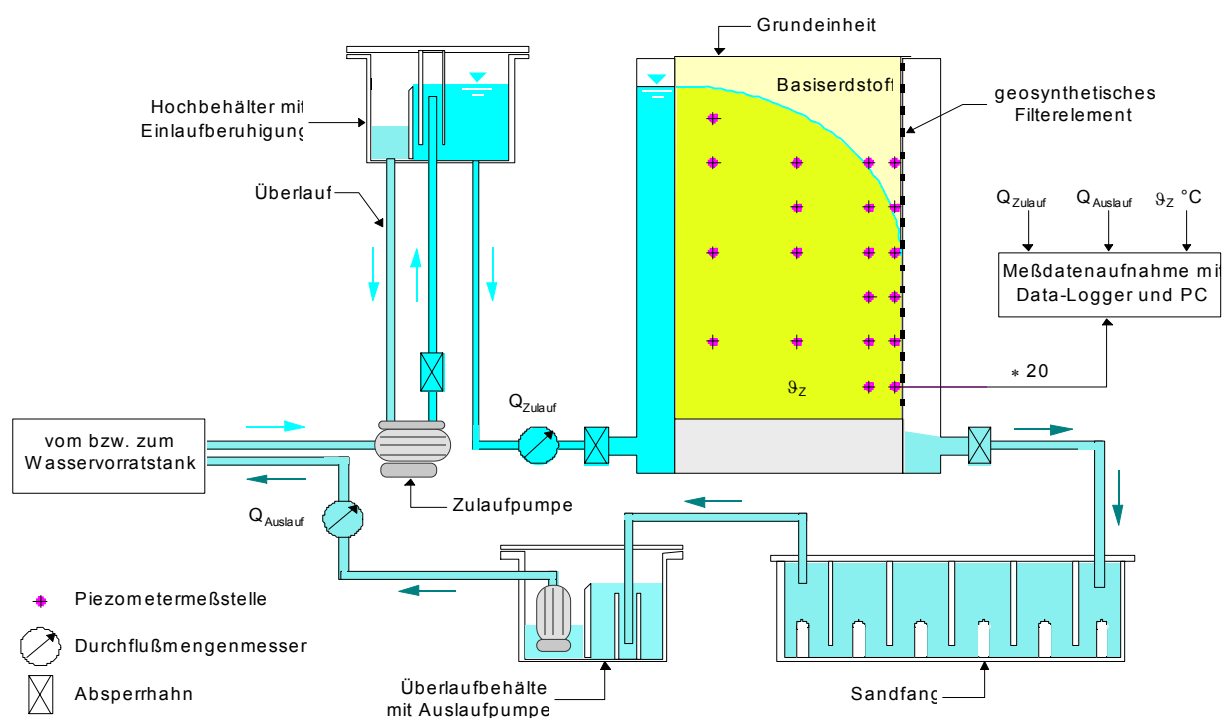


Abb. 4.4: Systemdarstellung der entwickelten Versuchsanlage

Abbildung 4.5 ausgelagert

Abb. 4.5: Versuchsanlage „Weimarer Zelle“

In der Grundeinheit wird ein Basiserdstoffvolumen von 360 Litern mit einer maximal möglichen Wasserdurchflußmenge von 2 l/s angeströmt. Die Wasserbevorratung erfolgt in einem externen Tank von dem aus das Wasser mittels Pumpe in den Hochbehälter gefördert wird. Das Wasser durchströmt die Grundeinheit in horizontaler Richtung und durchläuft den Sandfang, in dem sich eventuell ausgetragenes Verlustkorn des Basiserdstoffes sammelt. An den Sandfang angeschlossen ist der Überlaufbehälter aus dem das Wasser, wiederum mittels Pumpe, in den Vorrattank zurückgeführt wird. Innerhalb der Grundeinheit wird der Basiserdstoff im Zuströmbereich durch eine Stützrostkonstruktion gehalten. An der Auslaufseite ist der geosynthetische Prüfling (Abmessungen 60 cm * 100 cm) mittels Klemmverschraubungen auf einem weiteren Stützrost befestigt. Durch eine spezielle Einbautechnik an der Auslaufseite ist es möglich, die Kontaktverhältnisse zwischen Testboden und geotextilem Filter unter Verwendung einer Distanzkonstruktion den Grenzfällen 1 und 2 entsprechend zu variieren (siehe auch Abschnitt 4.2.3).



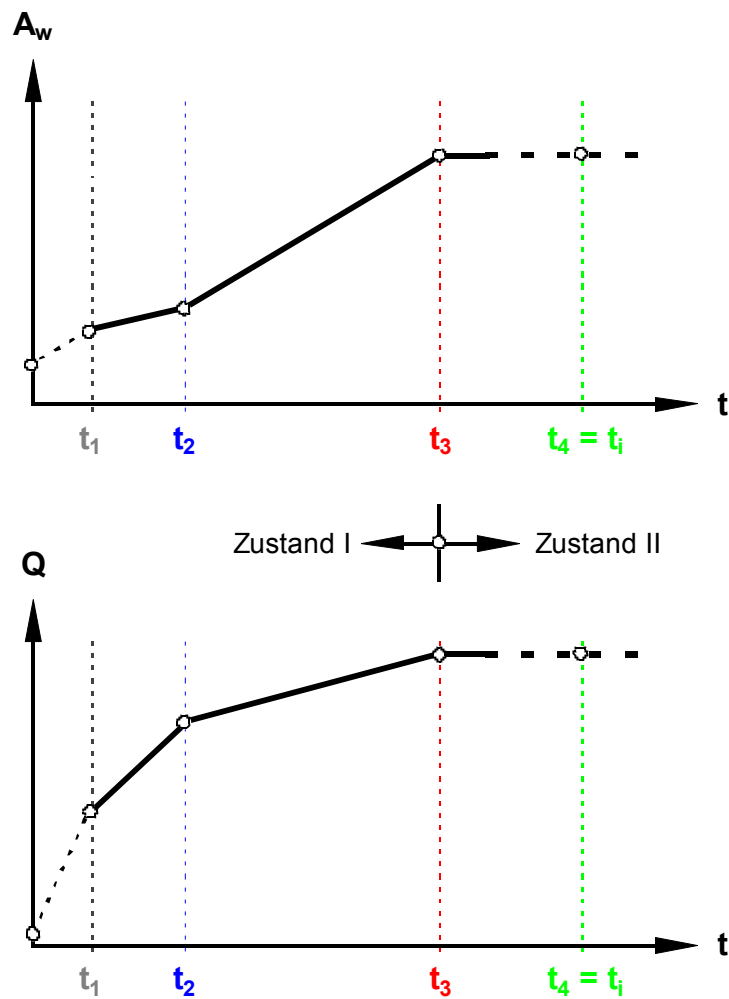
Bild a): Detail Druckaufnehmer



Bild c): Piezometermeßtechnik

Abb. 4.6: Spezielle
Piezometermeßtechnik zur
Aufnahme von Wasserdrücken

Während der Versuche gestattet eine speziell entwickelte Piezometermeßtechnik (Abb. 4.6) die zeitgleiche Aufnahme der Wasserdruckverhältnisse an 20 Meßpunkten in vier vertikalen Ebenen der Grundeinheit (Abb. 4.8). Die Lage der Meßstellen in der Mitte des horizontal angeströmten Bodenquerschnittes garantiert eine von Randstörungen unbeeinflusste Aufnahme der Wasserdruckverhältnisse. Des weiteren sind die Meßstellen in den Meßebenen so angeordnet, daß ihre Lage den Schnittpunkten von Strömungs- und Potentiallinien (Abb. 4.8) nachempfunden ist. Über separate Datenleitungen zu einem Datalogger erfolgt eine Meßstellenabfrage entsprechend der gewählten Tastzeit. Zur weiteren Verarbeitung werden die aufgenommenen Daten in einen PC eingelesen. Das Prinzip der Datenerfassung der Wasserdrücke beruht auf dem Empfang eines Spannungssignals der in



A_w : wasserableitewirksame Fläche des geosynthetischen Filterelementes in der Kontaktebene

Q : Wasserdurchflußmenge

t : Versuchsdauer

Abb. 4.7: Systemverhalten in der Kontaktzone Basiserdstoff/geosynthetisches Filterelement

Abb. 4.6 dargestellten Relativdruckaufnehmer, das anhand einer zuvor durchgeführten Kalibrierung im Zuge der weiteren Verarbeitung in korrespondierende Wasserdruckhöhen umgerechnet wird. Vervollständigt wird die rechnergesteuerte Meßdatenerfassung durch die Aufnahme der Wasserdurchflußmengen mittels Schaufelradsensoren und dem Einbau eines Temperaturfühlers in die Grundeinheit.

Die Zielsetzung, eine möglichst wirklichkeitsgetreue Durchführung der experimentellen Untersuchungen zu entwickeln, führte zu der Entscheidung, für die Großversuchsreihe Leitungswasser als Durchströmungsfluid zu verwenden. Nach [0] kann davon ausgegangen werden, daß eine unzulässige Beeinflussung der Versuchsergebnisse für Böden mit einer Durchlässigkeit $k < 10^{-3} - 10^{-4} \text{ m/s}$ durch die Ausscheidung von im Wasser enthaltener Luft

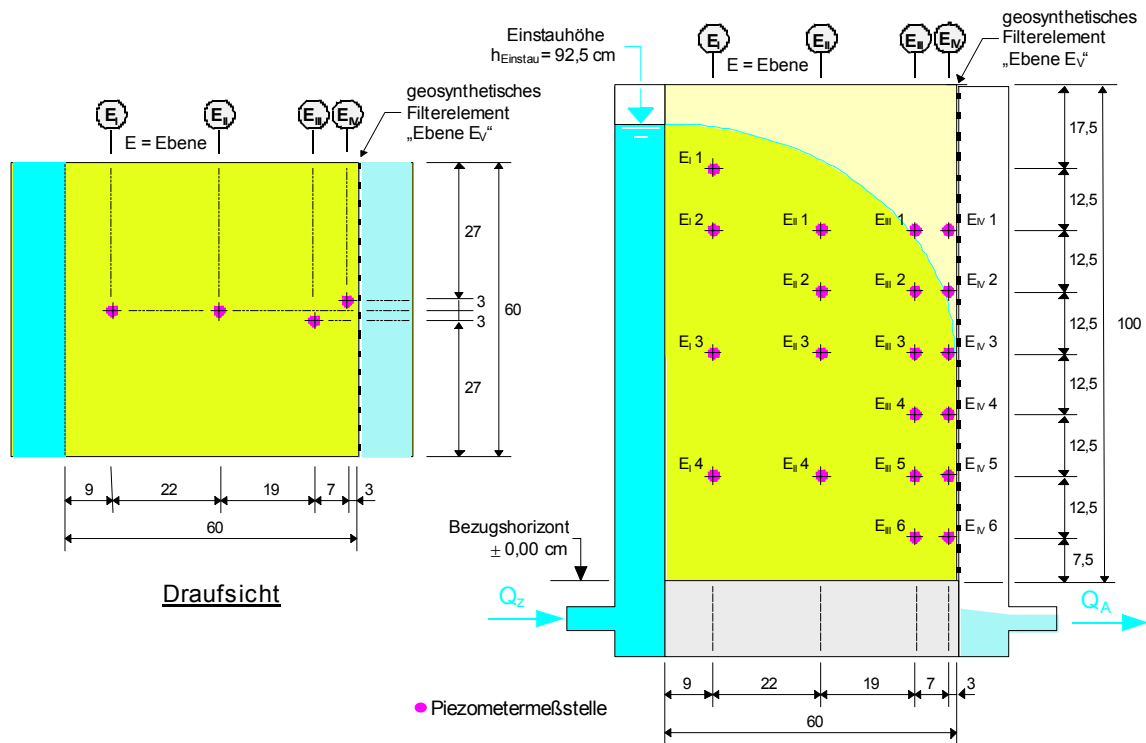


Abb. 4.8: Anordnung der Piezometermeßstellen in der Grundeinheit

und deren Anlagerung im Boden und im geotextilen Filter bei längeren Versuchszeiten nicht stattfindet (s. a. [0]). Die Befüllung des externen Vorratstanks erfolgte ungeachtet hiervon mindestens 24 h vor Versuchsbeginn, um ein Luftgleichgewicht zu erzielen. Begleitende Untersuchungen garantierten ferner, daß eine mikrobielle Beeinflussung des Durchlässigkeitsverhaltens während der Versuche ausgeschlossen war.

4.2.2 VERSUCHE MIT HYDRAULISCH EINGESTELTDEM KONTAKT

4.2.2.1 VERSUCHSABLAUF

Die praktische Durchführung der Teilversuche mit hydraulisch eingestellttem Kontakt zwischen dem mineralischen Basiserdstoff (Abb. 4.1) und den geosynthetischen Filtermaterialien NP 1 bis NP 3 und HB 1 bis HB 3 (Tab. 4.1) in der „Weimarer Zelle“ wurde so vorgenommen, daß gleiche Randbedingungen für alle Teilversuche durch das Regime

Abbildung 4.8 ausgelagert

Abb. 4.9: Praktische Durchführung der Großversuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt

(Abb. 4.9) gewährleistet werden konnten. Die Prüflinge HB 2 und NP 2 erhalten in diesem Teil der Untersuchungen die ergänzende Kennzeichnung HB 2/1 und NP 2/1; - z. B.: NP 2/1 = Großversuch mit Kontaktbedingungen analog Grenzfall 2, Hohlraum in der Grenzfläche.

Mit Grundlage der vor Beginn der Testreihe bestimmten Proctorkurve des Testsandes und der scheinbaren Kohäsion des Bodens konnten die Dichteverhältnisse in der Grundeinheit derart beeinflusst werden, daß für die Zeitspanne zwischen dem Entfernen der Distanzkonstruktion und dem Anfahren der Versuchsanlage ein über die volle Fläche des Prüflings künstlich erzeugter Hohlraum, Grenzfall 2 nach Abb. 4.2, von 1,5 cm zwischen geotextilem Filterelement und mineralischem Basiserdstoff vorlag (Abb. 4.9, Bild c) -Erzielte Einbaudichten $D_{\text{Einbau}} = 0,599$ bis $0,711$ entspr. „Dichter Lagerung“-.

Das mit dem Anfahren der Anlage horizontal zuströmende Wasser führte nach und nach zu einer Wassersättigung des Basiserdstoffes. Infolge des Wegfalles der scheinbaren Kohäsion des Testsandes und der hydraulischen Beanspruchung der Kornstruktur durch das Sickerwasser traten die unter den Abschnitten 2.4 und 3.2.2 beschriebenen Verfüllvorgänge des künstlich erzeugten Hohlraumes mit dem Basiserdstoff ein. (s. a. Baumbusch [0])

Während des Anfahrens der Versuchsanlage und dem ersten Versuchstag betrug das Intervall der Meßdatenaufnahme der Piezometermeßstellen 30 Sekunden. Danach wurde die Taktzeit auf 300 Sekunden verlängert. Parallel hierzu erfolgte die kontinuierliche Erfassung der Durchflußwassermengen und der Temperaturverhältnisse. Die Dauer der Großversuche lag zwischen 10 und 38 Tagen.

Bei Versuchsende wurden die Prüfmaterialien in der Reihenfolge 1. Basiserdstoff und 2. geosynthetischer Prüfling ausgebaut. Die Probenahmen des Basiserdstoffes zur Bestimmung der Kornverteilungskurven erfolgten in jeweils 4 Zonen über dem Bezugsniveau (0-10 cm, 15-25 cm, 30-40 cm und 45-55 cm) an der Zulauf- und Auslaufseite, sowie unmittelbar in der Kontaktzone Basiserdstoff/geosynthetischer Filter. Parallel zur Probenahme des Basiserdstoffes in der Kontaktzone wurden zugehörige Partialproben des geosynthetischen Filterelementes entnommen -visuelle Begutachtung, Bestimmung der Bodeneinlagerung- und der Sandfang auf eventuell ausgetragenes Verlustkorn hin überprüft -Kontrolle der Gewährleistung der mechanischen Filterwirksamkeit-. Zusätzlich wurde mehrfach die Lagerungsdichte des Testbodens über Entnahmestutzen in 3 Höhenlagen -Oben, Mitte, Unten- oberhalb des Bezugsniveaus ermittelt.

4.2.2.2 ERGEBNISDARSTELLUNG

Die nachfolgend dargestellten Untersuchungsergebnisse basieren auf der Durchführung von Filtrationsversuchen in der „Weimarer Zelle“ mit hydraulisch eingestelltem Kontakt zwischen mineralischem Basiserdstoff (Abb. 4.1) und geosynthetischem Filterelement (Abb. 4.3 und Tab. 4.1). Die Aus- und Bewertung der Versuchsergebnisse wird in Kapitel 5 vorgenommen.

Das Wasserdurchlässigkeitsverhalten der untersuchten Geotextil-Boden-Systeme in der Kontaktzone Basiserdstoff/geosynthetisches Filterelement über die Versuchsdauer kann entsprechend Abb. 4.7, in die Versuchsphasen der Zustände I und II systematisiert werden. Während des Beginns der in den Großversuchen simulierten funktionellen Gebrauchsphase nach Abb. 2.9 ist das Systemverhalten durch das Vorliegen instationärer Verhältnisse gekennzeichnet -Zustand I, Filtereinlaufzeit t_1 bis t_3 -. Nach dem Abschluß der Filtereinlaufzeit dominieren quasi-stationäre Bedingungen im System -Zustand II, Langzeitphase t_3 bis $t_4 = t_i$ -.

Zustand I: Ständige Veränderung der Gleichgewichtszustände im System; Filtereinlaufzeit

Phase $t_1 - t_2$ -Phase differenter Prozesse-

- * Sukzessive Vergrößerung der wasserableitewirksamen Filterfläche A_w in der Kontaktebene und ausgeprägter Anstieg der Wasserdurchflußmenge Q
- * Sättigungsphase des mineralischen Basiserdstoffes
- * Einsetzende Verfüllvorgänge in der Kontaktzone Basiserdstoff/geotextiler Filter
- * Herausbildung bevorzugter Wasserwegigkeiten in Zonen verfüllter Hohlräume
- * Einsetzende Stabilisierung der Grenzfläche Basiserdstoff/geosynthetischer Filter

Phase $t_2 - t_3$ -Stabilisierungsphase-

- * Zunahme der angeströmten wasserableitewirksamen Filterfläche A_w und verlangsamer Anstieg der Wasserdurchflußmenge Q
- * Verfüllvorgänge in der Kontaktzone Basiserdstoff/geotextiler Filter
- * Veränderungen der Lage der Sickerlinie im rückwärtigen Anströmbereich; Aufbau eines Sekundärfilters
- * Stabilisierung der Grenzfläche Basiserdstoff/geosynthetischer Filter
- * Abschluß der Sättigungsphase

Zustand II: Phase $t_3 - t_i$ -Quasi-stationäre Verhältnisse; Langzeitphase-

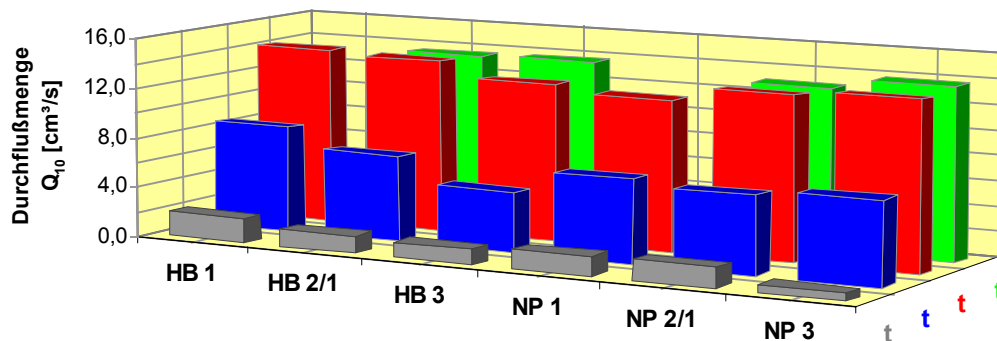
- * Quasi-konstante angeströmte Filterfläche A_w und Wasserdurchflußmenge Q
- * Quasi-konstante Lage der Sickerlinie
- * Verfüllte Hohlräume in der Grenzfläche Basiserdstoff/geotextiler Filter
- * Präsenz eines quasi-stationären, neuen Gleichgewichtszustandes im System mineralischer Basiserdstoff + geosynthetisches Filterelement + Sickerwasser

Die Verfüllvorgänge des durch die spezielle Einbautechnik erzielten künstlichen Hohlraumes in der Grenzfläche mineralischer Basiserdstoff/geosynthetischer Filter wurden mit dem Anfahren der Versuchsanlage eingeleitet (s. a. [0]). Mit der danach über die gesamte Versuchsdauer konstanten Einstauhöhe von $h_{\text{Einstau}} = 92,5 \text{ cm}$ an der Zulaufseite der Grundeinheit konnten über die Umrechnung der Spannungsmeßkurven der Piezometermeßstellen die in Abb. 4.11 dargestellten piezometrischen Wasserdruckprofile der Meßebenen E_I bis E_{IV} konstruiert werden. Bei Betrachtung der Größenachse p in Abb. 4.11 ist zu beachten, daß für die Teilversuche NP 2/1, NP 3 und HB 2/1 sowohl positive Wasserdrücke, als auch „negative“ Drücke p in Form von Saugspannungen in den Meßebenen E_{III} und E_{IV} festgestellt wurden.

Die Darstellungszeitpunkte t_1 , t_2 , t_3 und $t_4 = t_i$ der Wasserdruckprofile repräsentieren den Beginn bzw. das Ende maßgebender Versuchsphasen der Zustände I und II im System (Abb. 4.7); $t_4 = t_i$ = beliebiger Zeitpunkt während der Langzeitphase. Für die Prüflinge NP 1 und HB 1 wurde zugunsten einer längeren Versuchslaufzeit anderer Teilversuche auf die Bestimmung eines Zeitpunktes $t_4 = t_i$ der Langzeitphase verzichtet.

Unter sonst gleichen Bedingungen zeigt sich, daß die Wasserdrücke p [N/cm^2] in Abb. 4.11 für alle Großversuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt in den Ebenen E_I und E_{II} zum Zeitpunkt t_2 ihren Maximalwert erreichen. Mit zunehmender Versuchsdauer und fortschreitender Wassersättigung des Basiserdstoffes ist eine Abnahme der Wasserspiegelhöhen bis zum Zeitpunkt t_3 zu beobachten. Ursache dieser Abnahme sind z. B. die sich infolge der Stabilisierung erhöhenden Fließgeschwindigkeiten im System, die zu einer Erhöhung der Geschwindigkeitshöhenverluste führen. Während der Langzeitphase im System mit $t_4 = t_i$ herrschen dann quasi-stationäre Verhältnisse vor.

Das Vorliegen von Zonen unterschiedlicher Wasserwegigkeiten innerhalb des großmaßstäblich homogenen Bodenkörpers und im Anströmbereich vor dem geosynthetischen Prüfling wird bei Betrachtung der Meßergebnisse in den Ebenen E_{III} und E_{IV} deutlich. Besonders während der Phase differenter Prozesse im Zustand I ($t_1 - t_2$) nach Abb. 4.7 sind, NP 2/1 ausgenommen, mehrere Horizonte bevorzugter Wasserwegigkeiten in allen Systemen erkennbar. Diese treten als Partialwasserdrücke in unterschiedlichen Höhenlagen der Ebenen E_{III} und E_{IV} auf (Abb. 4.11) und bleiben teilweise über die gesamte Versuchsdauer erhalten. Erst in der Stabilisierungsphase ($t_2 - t_3$ in Abb. 4.7) setzt mit der fortschreitenden hydraulisch initiierten Verfüllung des künstlichen Hohlraumes in der



	HB 1	HB 2/1	HB 3	NP 1	NP 2/1	NP 3
$Q_{10} (t_1)$ [cm³/s]	1,9	1,4	1,2	1,6	1,6	0,6
$Q_{10} (t_2)$ [cm³/s]	8,5	6,9	4,8	6,7	6,2	6,7
$Q_{10} (t_3)$ [cm³/s]	14,1	13,8	12,6	12,0	13,1	13,5
$Q_{10} (t_4)$ [cm³/s]	—*)	13,6	13,8	—*)	13,0	13,8
*) keine Bestimmung von t_4 als beliebigem Zeitpunkt der Langzeitphase						

Abb. 4.10: Durchflußmengendiagramm der Großversuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt

Abbildung 4.10 a ausgelagert

Abb. 4.11 a: Wasserdruckprofile in den Meßebenen E_I bis E_{IV} ; Bilder a) - c)

Abbildung 4.10 b ausgelagert

Abb. 4.11 **b**: Wasserdruckprofile in den Meßebenen E_I bis E_{IV} ; Bilder d) - f)

Grenzfläche Basiserdstoff/geotextiler Filter die Ausbildung einer zusammenhängenden Durchströmungszone vor dem Filter ein. Die zunehmende Stabilisierung des Systems steht in direktem Zusammenhang mit dem Aufbau eines sekundären Filters im Anströmbereich des geotextilen Prüflings -rückwärtiger Filteraufbau im Anströmbereich-. Die bereichsweise vorhandenen Saugspannungen oberhalb des wasserableitewirksamen Strömungsquerschnittes können auf die in Richtung der Auslaufseite zunehmende Durchflußgeschwindigkeit und eine damit verbundene Erhöhung der Energieverluste infolge Reibung sowie Sättigungsvorgänge des mineralischen Basiserdstoffes zurückgeführt werden.

Aus Sicht des zeitlichen Verlaufes der maßgebenden Versuchsabschnitte nach Abb. 4.7 sind die untersuchten Geotextil-Boden-Systeme differenziert zu betrachten. Für die Phase differenter Prozesse des Zustandes I bis zum Erreichen des Zeitpunktes t_2 sind keine signifikanten Unterschiede im jeweiligen Systemverhalten erkennbar. Die Dauer der Stabilisierung der Systeme zwischen t_2 und t_3 zeigt dann die Tendenz, daß sich quasi-stationäre Verhältnisse (Zustand II in Abb. 4.7) bei den Vliesstoffen HB 1 bis 3 frühzeitiger einstellen als bei NP 1 bis NP 3.

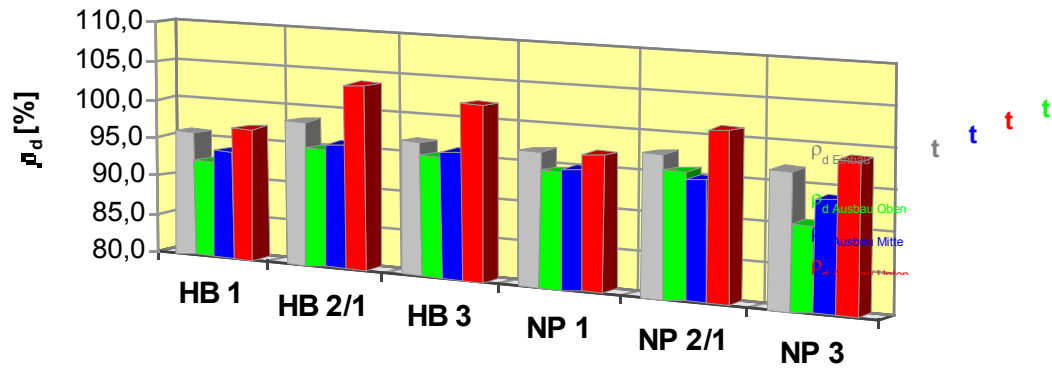
Neben den in Abb. 4.11 dargestellten Wasserdruckprofilen maßgebender Versuchsphasen sind die zugehörigen absoluten Wasserdurchflußmengen Q_{10} [cm³/s] der gleichen Zeitpunkte in Abb. 4.10 aufgetragen und mit Zahlenwerten hinterlegt. Auch hier bestätigt eine qualitative Betrachtung des Systemverhaltens der Teilversuche die Präsenz der maßgebenden Versuchsabschnitte nach Abb. 4.7. Die Absolutwerte der infiltrierten Durchflußmengen Q_{10} weichen nur wenig voneinander ab und deuten scheinbar auf ein gleiches Wasserdurchlässigkeitsverhalten der Prüflinge hin.

Wesentliche Rückschlüsse auf die Entwicklung des Wasserdurchlässigkeitsverhaltens der geotextilen Filterelemente HB 1 bis 3 und NP 1 bis 3 während der Systemprüfung können aus der Konstruktion der Sickerlinien zu unterschiedlichen Versuchszeitpunkten nach Abb. 4.23 abgeleitet werden. Datenbasis der dargestellten Wasserspiegelordinaten in den Meßebenen E_I bis E_{IV} sind die während der Versuche aufgenommenen Meßdaten der Piezometermeßstellen. Die Lage der Sickerlinie an der Auslaufseite in Meßebene E_V wurde auf Grundlage der visuellen Begutachtung der Prüflinge nach dem Ausbau und durch Extrapolation des Sickerlinienverlaufes von E_{IV} nach E_V ermittelt. Angesichts der Tatsache, daß eine gesicherte Bestimmung der Lage der Sickerlinie mit den Piezometermeßstellen der Ebene E_{IV} möglich ist, stellt diese Vorgehensweise eine gute Annäherung dar.

Das bereits im Zusammenhang mit der Darstellung von Wasserdruckprofilen nach Abb. 4.11 und der Darstellung absoluter Durchflußwassermengen in Abb. 4.10 erläuterte Systemverhalten über die Versuchsdauer wird folgerichtig auch bei Betrachtung des Verlaufes der Sickerlinien deutlich. Als besonders signifikant sind hierbei die Sickerlinien der Prüflinge HB 3 und NP 3 zu bezeichnen. Deutlich setzen sich die Verläufe der Standrohrspiegelhöhen der Zeitpunkte t_1 und t_2 vom Ende der Stabilisierungsphase - t_3 - und der Langzeitphase mit $t_4 = t_i$ ab.

An der Zulaufseite zeigt sich bei NP 2/1 und NP 3 der Einfluß von Stabilisierungs- und Sättigungsmechanismen im Bodenkörper -Rückgang der Sickerordinate im Bereich von Ebene E_I , Ausbildung eines bis zu E_I gestörten Randströmungsbereiches-. Die für NP 2/1 und NP 3 beobachtete Entwicklung der Höhenlage der Randstromlinie an der Zulaufseite konnte für die Prüflinge NP 1 und HB 1 bis 3 nicht festgestellt werden.

Abweichend von anderen Teilversuchen ist bei HB 2/1 ein vergleichsweise großer Anstieg der Sickerlinie in Ebene E_V bereits zum Zeitpunkt t_2 erkennbar. Während der Langzeitphase - t_3 bis t_4 - stellt sich dann ein leichter Rückgang der Sickerordinate in der Kontaktzone ein. Mit



	HB 1	HB 2/1	HB 3	NP 1	NP 2/1	NP 3
ρ_d Einbau [%]	95,94	98,48	96,90	96,90	97,79	96,87
ρ_d Ausbau, Oben [%]	92,36	95,07	95,26	94,66	95,80	90,64
ρ_d Ausbau, Mitte [%]	93,92	95,72	96,02	95,02	94,96	93,86
ρ_d Ausbau, Unten [%]	96,99	103,52	102,11	97,02	101,19	98,67
Basiserdstoff $\rho_{pr} = 1,846 \text{ [g/cm}^3\text{]}$						

Abb. 4.12: Dichteverhältnisse des Basiserdstoffes in der Grundeinheit nach dem Einbau und bei Versuchsende

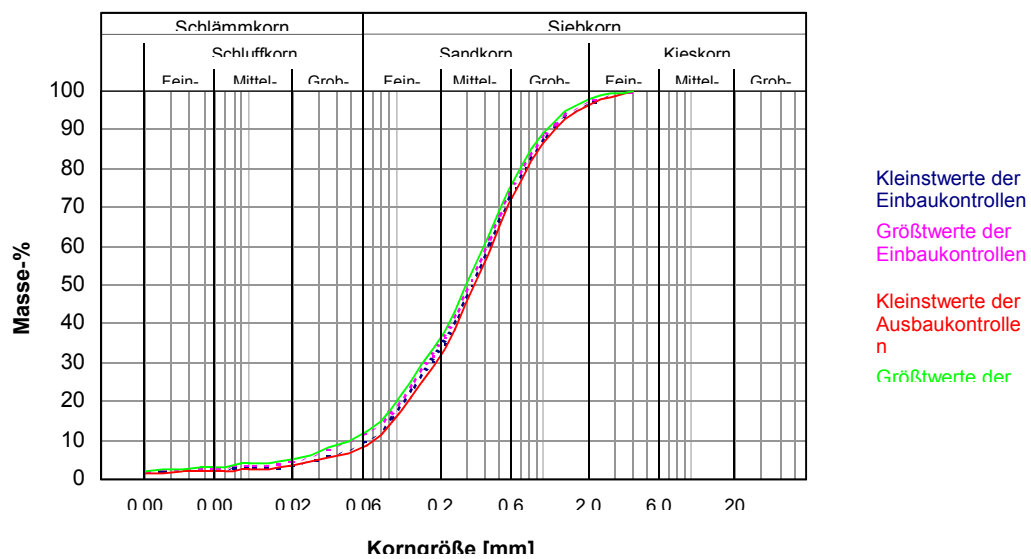


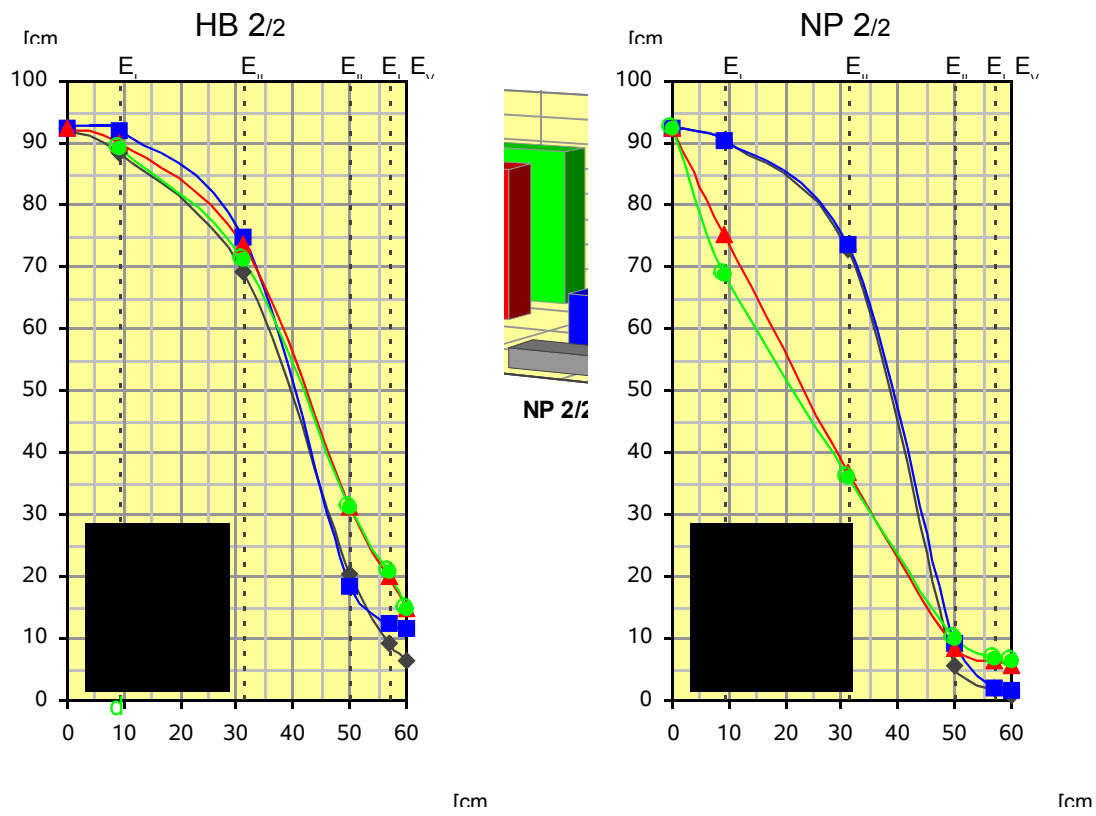
Abb. 4.15: Korngrößenverteilungen des Testsandes beim Einbau und nach Versuchsende -Versuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt-

Die Absolutwerte der als wasserableitewirksam bezeichneten Filterfläche A_w in Ebene E_v nach Abb. 4.14 lassen deutlich erkennen, daß das Wasserdurchlässigkeitsverhalten der Systeme von der fortschreitenden Hohlraumverfüllung in der Filtereinlaufzeit beeinflusst wird -Zunahme der wasserableitewirksamen Filterflächen A_w von z. B. t_2 nach t_3 -. Datenbasis der in Abb. 4.14 aufgetragenen Werte von A_w [cm²] sind die Lage der Sickerlinien in der Kontaktfläche -Ebene E_v nach Abb. 4.23- und die Breite des angeströmten Bodenkörpers in der Grundeinheit.

Für die Bewertung des Systemverhaltens der untersuchten Filterkonstruktionen bildet A_w eine wichtige Größe, weil in Verbindung mit den Absolutwerten der Wasserdurchflußmengen Q_{10} [cm³/s] nach Abb. 4.10 die Berechnung der flächenbezogenen Durchflußrate möglich wird.

Ohne den Ausführungen in Kapitel 5 vorzugreifen fällt auf, daß die wasserableitewirksamen Filterflächenanteile der Prüflinge HB 1, HB 3 und NP 1 bis NP 3 eine sehr ähnliche Entwicklung über die Versuchsdauer aufweisen. Zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 sind deutlich die Einflüsse noch nicht verfüllter Hohlräume in der Grenzfläche sowie teilgesättigter Bodenzonen erkennbar. Diese behindern den Anstieg der Sickerordinate an der Auslaufseite bzw. verhindern diesen bei HB 3. Während der Langzeitphase -Zeitpunkte t_3 und t_4 - wird dann ein Maximum von A_w erreicht.

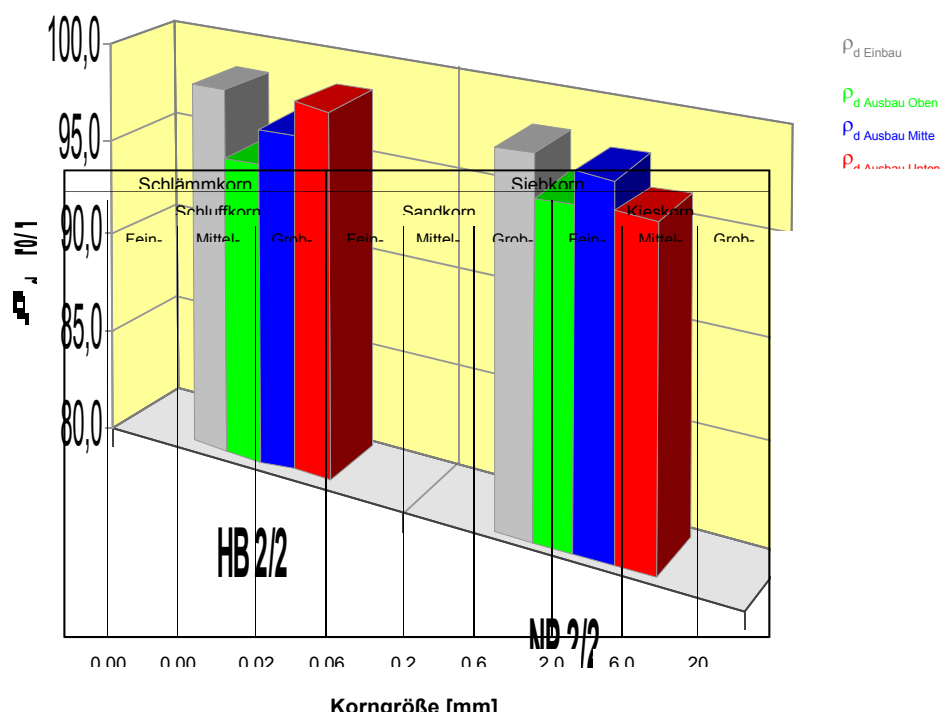
Die Unterscheidung in die Versuchsphasen der Zustände I und II auf Grundlage von A_w ist bei HB 2/1 zu modifizieren. Nach einem vergleichsweise geringen Anstieg der wasserableitewirksamen Filterfläche von t_1 nach t_2 , ausgehend vom größten Anfangswert $A_w(t_1)$ der Versuchsreihe, wird dieser Wert auch bei t_3 beibehalten und ist zum Zeitpunkt t_4 leicht rückläufig.



	HB 2/2	NP 2/2
$Q_{10}(t_1)$ [cm³/s]	1,1	1,4
$Q_{10}(t_2)$ [cm³/s]	4,0	4,0
$Q_{10}(t_3)$ [cm³/s]	11,7	12,4
$Q_{10}(t_4)$ [cm³/s]	12,1	11,8

Abb. 4.16: Durchflußmengendiagramm der Großversuche mit vollflächigem Kontakt

t_1 t_2 t_3 t_4



	HB 2/2	NP 2/2
ρ_d Einbau [%]	98,39	98,17
ρ_d Ausbau, Oben [%]	94,99	96,15
ρ_d Ausbau, Mitte [%]	96,78	97,64
ρ_d Ausbau, Unten [%]	98,37	96,19
Basiserdstoff $\rho_{pr} = 1,846$ [g/cm³]		

Abb. 4.20: Dichteverhältnisse des Basiserdstoffes in der Grundeinheit nach dem Einbau und bei Versuchsende



Bild a): Einsetzender Wasseraufstau auf dem Prüfling

Abb. 4.21: Momentaufnahmen während der Durchführung von Benetzungsversuchen

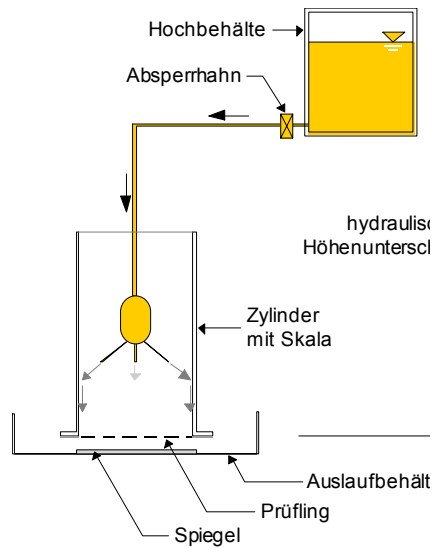


Bild a): Systemdarstellung

Abb. 4.22: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Einflusses von Benetzungswiderständen

Abb. 4.23 a): Entwicklung der Lage der Sickerlinie; Bilder a) - c)

-

Abbildung 4.12 b ausgelagert

Abb. 4.23 **b**: Entwicklung der Lage der Sickerlinie; Bilder d) - f)

Der Rückschluß des nach Abb. 4.10 noch scheinbar gleichen Wasserdurchlässigkeitsverhaltens aller geotextilen Prüflinge ist mit Kenntnis der wasserableitewirksamen Filterflächen in Abb. 4.14 nicht mehr haltbar und bedarf einer differenzierten Analyse.

Für alle Ergebnisdarstellungen der Abb. 4.7 bis Abb. 4.14, insbesondere für Daten die das Langzeitverhalten der untersuchten Geotextil-Boden-Systeme charakterisieren, ist zu beachten, daß praktische Untersuchungen grundsätzlich unvermeidbaren Schwankungen und Einflüssen unterliegen; z. B. Entwicklung der Durchflußwassermengen. Es ist daher erforderlich, den Begriff der „stationären Verhältnisse“ im Sinne „quasi-stationäre Verhältnisse“ zu modifizieren.

Begleitende Untersuchung der geosynthetischen Prüflinge nach Versuchsende

Das Kriterium der mechanischen Filterwirksamkeit aller beprobten geotextilen Filtermaterialien ist mit Grundlage des erzielten Bodenrückhaltes des Basiserdstoffes in der Grenzfläche -kein Verlustkorn im Sandfang feststellbar- als erfüllt anzusehen.

Nach dem Ausbau der geosynthetischen Prüfmateriale aus der Grundeinheit wurden bei allen Versuchen sogenannte Partialprüflinge in unterschiedlichen Höhenlagen aus der Gesamtfläche (60 cm * 100 cm) entnommen. Die anschließende visuelle Begutachtung lieferte hinsichtlich Beschädigung, mikrobieller Prozesse etc. keine Hinweise. Des weiteren erfolgte die Bestimmung des Massenanteils der während der Versuche in die Vliesstoffe eingelagerten Bodenpartikel mittels Auswaschung.

Für die unterhalb der Sickerlinie in Ebene E_v gelegenen Teilproben -Bereich von A_w - sind die Ergebnisse der Massenbestimmung eingelagerter Bodenpartikel in Bezug zum Netto-Flächengewicht des Prüflings in Abb. 4.13 prozentual aufgetragen. Im Vergleich zu NP 1 bis NP 3 weisen hierbei die Prüflinge HB 1 bis 3 einen deutlich höheren Bodeneinlagerungsgrad auf.

Untersuchungen zur Kornstruktur des Basiserdstoffes

Die Untersuchung von Auswirkungen hydraulisch bedingter Verfüllvorgänge auf die Kornstruktur des Basiserdstoffes stützen sich auf die Bestimmung der Kornverteilungskurven des Testsandes im Zuge des Einbaues bzw. nach Versuchsende (Abb. 4.15) und der Entwicklung der Lagerungsdichte des Testbodens in der Grundeinheit infolge hydraulischer Beanspruchung durch das Sickerwasser (Abb. 4.12).

Die Kleinst- und Größtwerte aller während der Großversuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt durchgeführten Ein- und Ausbauprobenahmen des Basiserdstoffes mit anschließender Bestimmung der Korngrößenverteilung sind in Abb. 4.15 aufgetragen. Die Grundgesamtheit der dargestellten 4 Korngrößenverläufe wird von insgesamt 90 Einzelanalysen gebildet und zeigt keine signifikanten Unterschiede der Korngrößenzusammensetzung zwischen Einbau und Ausbau.

Bei Betrachtung der Dichteverhältnisse, enthalten in Abb. 4.12 in Form von ρ_d mit der Bezugsgröße 100 % der einfachen, zuvor bestimmten Proctordichte des Basiserdstoffes, zeigt sich eine für alle Teilversuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt sehr ähnliche Situation.

Im oberen und mittleren Drittel der Grundeinheit, 60 cm bis 100 cm bzw. 30 cm bis 60 cm über dem Bezugshorizont, ist eine Abnahme der Lagerungsdichte unter den Einbauwert für alle Versuche feststellbar. In einer Höhe bis 30 cm über Nullniveau hingegen ist eine Erhöhung von ρ_d über den Einbauwert hinaus zu verzeichnen. Dieser wird für HB 1 und NP 1

nur wenig überschritten und steigt bei HB 2/1, HB 3 und NP 2/1 bis über 100 % der einfachen Proctordichte an, was mit einer Überverdichtung gleichzusetzen ist.

4.2.3 VERSUCHE MIT VOLLFLÄCHIGEM KONTAKT NACH DEM EINBAU

4.2.3.1 VERSUCHSABLAUF

Im zweiten Abschnitt der großmaßstäblichen Laborversuche in der „Weimarer Zelle“ wurde das Wasserdurchlässigkeitsverhalten der Prüflinge HB 2 und NP 2 in Analogie zum Idealzustand des Intimate Contact nach Grenzfall 1 in Abb. 4.2 untersucht. Für diesen Teil der experimentellen Untersuchungen erhalten HB 2 und NP 2 die Zusatzkennzeichnung HB 2/2 und NP 2/2; z. B.: NP 2/2 = Großversuch mit Kontaktbedingungen analog Grenzfall 1, vollflächiger Kontakt.

Das Ablaufschema der Großversuche mit vollflächigem Kontakt in der Grenzfläche zwischen Basiserdstoff und geosynthetischem Filterelement entspricht, ausgenommen Arbeitsschritte, die im Zusammenhang mit der Erzeugung des Hohlraumes in der Grenzfläche stehen, grundsätzlich der unter Abschnitt 4.2.2.1 genannten Vorgehensweise.

Mit der, wie auch für die Versuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt, erzielten „Dichten Lagerung“ des Testbodens in der Grundeinheit $-D_{\text{Einbau}} = 0,659$ und $0,669$ - sind durch die gewählte Vorgehensweise gleiche Randbedingungen für die Großversuche HB 2/2 und NP 2/2 geschaffen worden. Die Kalibrierung und Einstellung der PC-gesteuerten Datenerfassung während der Versuchslaufzeit -Dauer 25 und 34 Tage- wurde, wie unter Kapitel 4.2.2.1 beschrieben, vorgenommen. Gleiches gilt für die Erfassung der Durchflußwassermengen und Temperaturverhältnisse.

Das Regime der Probenahme der Prüfmateriale geosynthetisches Filterelement und mineralischer Basiserdstoff blieb ebenfalls unverändert (Kapitel 4.2.2.1).

4.2.3.2 ERGEBNISDARSTELLUNG

Die Ergebnisdokumentation der Großversuche mit vollflächigem Kontakt im Zuge des Einbaus, HB 2/2 und NP 2/2, folgt der durch die Versuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt vorgegebenen Struktur. Aus- und Bewertung der Versuchsergebnisse sind Kapitel 5 der Arbeit zu entnehmen.

Das Wasserdurchlässigkeitsverhalten der Filterkonstruktionen kann in Analogie zu Abb. 4.7 in die Versuchsphasen der Zustände I und II systematisiert werden. Zu bemerken ist, daß ein gleiches qualitatives Systemverhalten beider Versuchsreihen im Hinblick auf die Quantität der Ergebnisse keine Rückschlüsse zuläßt. Dies hat insbesondere für die Quantität der wasserableitewirksamen Filterfläche A_w zu gelten. Gleichwohl erfordert es die veränderte Kontaktsituation zwischen Basiserdstoff und geotextilem Filter nach Abb. 4.2, auf die die Zustände I und II kennzeichnenden Prozesse und Mechanismen einzugehen:

Zustand I: Ständige Veränderung der Gleichgewichtszustände im System; Filtereinlaufzeit

Phase $t_1 - t_2$ -Phase differenter Prozesse-

- * Sukzessive Vergrößerung der wasserableitewirksamen Filterfläche A_w
in der Kontaktebene und ausgeprägter Anstieg der Wasserdurchflußmenge Q
- * Sättigungsphase des mineralischen Basiserdstoffes
- * Einsetzende Stabilisierung der Grenzfläche Basiserdstoff/geosynthetischer Filter

Phase $t_2 - t_3$ -Stabilisierungsphase-

- * Zunahme der angeströmten wasserableitewirksamen Filterfläche A_w und verlangsamer Anstieg der Wasserdurchflußmenge Q
- * Aufbau eines Sekundärfilters im rückwärtigen Anströmbereich
- * Stabilisierung der Grenzfläche Basiserdstoff/geosynthetischer Filter
- * Abschluß der Sättigungsphase

Zustand II: Phase $t_3 - t_i$ -Quasi-stationäre Verhältnisse; Langzeitphase-

- * Quasi-konstante angeströmte Filterfläche A_w und Wasserdurchflußmenge Q
- * Quasi-konstante Lage der Sickerlinie
- * Präsenz eines quasi-stationären, neuen Gleichgewichtszustandes im System mineralischer Basiserdstoff + geosynthetisches Filterelement + Sickerwasser

Die in Abb. 4.24 dargestellten Wasserdruckprofile in den Meßebenen E_I bis E_{IV} zeigen, daß der Maximalwert der Wasserdrücke p [N/cm^2] der Versuche HB 2/2 und NP 2/2 in den Ebenen E_I und E_{II} , wie für die Versuchsreihe mit hydraulisch eingestelltem Kontakt zum Zeitpunkt t_2 erreicht wird. Danach schließt sich ein leichter Rückgang von p bei HB 2/2 und eine ausgeprägte Abnahme der Sickerordinaten bei NP 2/2 während der Zeitpunkte t_3 und t_4 an. Mit der ausgeprägten Abnahme der Sickerordinate bei NP 2/2, geht das Auftreten von Saugspannungen oberhalb des Sickerwasserspiegels einher.

Die teils prägnante Ausbildung bevorzugter Wasserwegigkeiten in den Wasserdruckprofilen von Abb. 4.11 ist in Abb. 4.24 nur in abgeschwächter Form feststellbar. Grundsätzlich ist festzuhalten, daß die Entwicklung der Wasserdruckordinaten der Ebenen E_{III} und E_{IV} vergleichsweise kontinuierlich verläuft und die Homogenität der Kornstruktur des Basiserdstoffes im unmittelbaren Anströmbereich vor der Kontaktzone deutlich durch den stetigen Verlauf der gemessenen piezometrischen Wasserdruckprofile zu Tage tritt. Eine Ausbildung bevorzugter Wasserwegigkeiten zeigt sich nur vereinzelt.

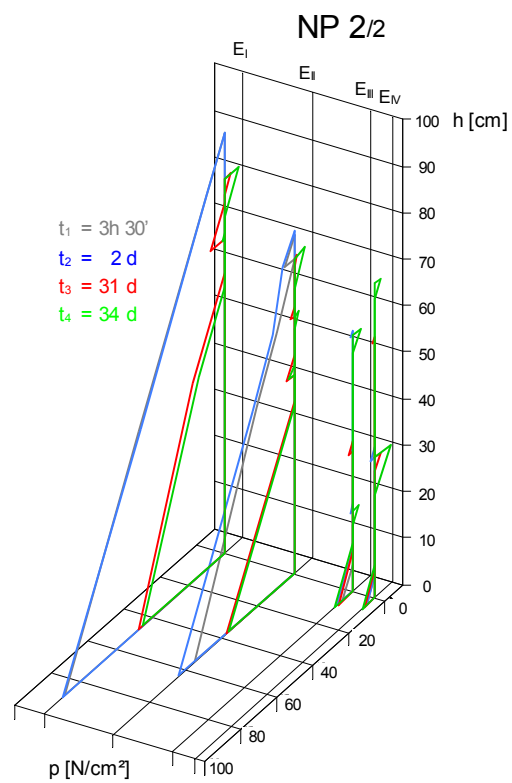
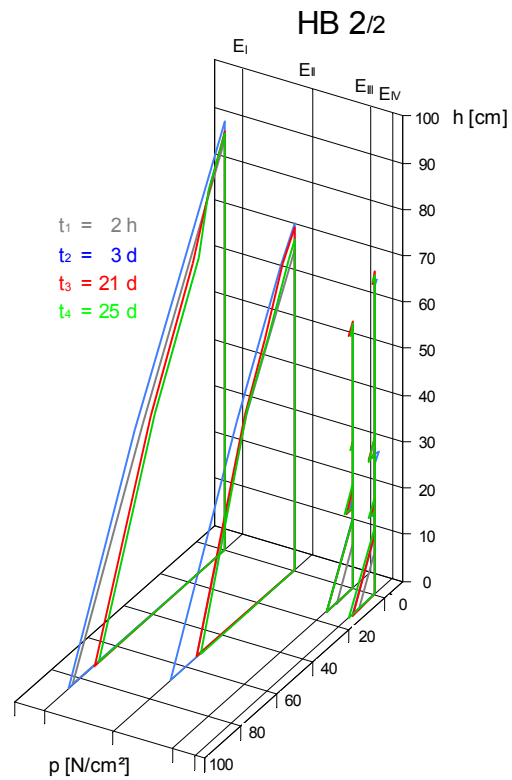


Bild a)

Bild b)

Abb. 4.24: Wasserdruckprofile in den Meßebenen E_I bis E_{IV} ; Bilder a) und b)

Der zeitliche Verlauf der jeweiligen Versuchsphasen weist mit der Lage des Zeitpunktes t_3 auf eine etwa um den Faktor 1,5 längere Stabilisierungsphase von NP 2/2 im Vergleich zu HB 2/2 hin. Die Lage der Zeitpunkte t_1 und t_2 innerhalb der Testreihe zeigt keine signifikanten Unterschiede. Gleiches gilt für die Absolutwerte der infiltrierten Wassermengen Q_{10} [cm³/s] nach Abb. 4.16, die wie schon in Abb. 4.10 auf ein sehr ähnliches Wasserdurchlässigkeitsverhalten der Prüflinge hindeuten und darüber hinaus auch die Einflüsse unterschiedlicher geotextiler Prüflinge und Kontaktverhältnisse scheinbar in den Hintergrund treten lassen.

Bild a)

Bild b)

Abb. 4.25: Entwicklung der Lage der Sickerlinie während signifikanter Versuchsphasen
-vollflächiger Kontakt im Zuge des Einbaus; Bilder a) und b)

Bei Betrachtung der Entwicklung der Lage der Sickerlinie der Bilder a) + b) in Abb. 4.25 und dem hieraus abgeleiteten Verlauf der wasserableitewirksamen Filterfläche A_w in Abb. 4.19 werden Unterschiede im Wasserdurchlässigkeitsverhalten der geosynthetischen Prüflinge erstmals signifikant offenbar. Während das prinzipielle Systemverhalten von HB 2/2 und NP 2/2 mit den zu Beginn dieses Kapitels genannten Gesetzmäßigkeiten charakterisiert werden kann, ergeben sich Unterschiede im Absolutwert von A_w nach Abb. 4.19. Diese entsprechen zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 etwa einem Verhältnis von $A_{w\text{ HB 2/2}} : A_{w\text{ NP 2/2}}$ von 7 bis 8 : 1 und reduzieren sich für t_3 , t_4 dann auf ein Verhältnis von etwa 2 bis 3 : 1.

Der Verlauf der Sickerlinie maßgebender Versuchsphasen in Abb. 4.25 läßt das für die Kontaktzone beschriebene Systemverhalten der Zustände I und II in den Ebenen E_I und E_{II} bei HB 2/2 in den Hintergrund treten. Für NP 2/2 hingegen zeigt sich dieses deutlich. Die Sickerordinaten des Zustandes II von NP 2/2 - E_I bis E_{V-} - deuten mit ihrem Verlauf auf eine „Sogwirkung“ des geotextilen Filterelementes an der Auslaufseite hin.

Begleitende Untersuchung der geosynthetischen Prüflinge nach Versuchsende

Die Forderung der mechanischen Filterwirksamkeit -Bodenrückhaltevermögen- der Geotextilien gegenüber der Kornstruktur des Basiserdstoffes ist auch für die Untersuchungen nach Grenzfall 1 in Abb. 4.2 erfüllt.

In Analogie zur Verfahrensweise der Versuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt sind von HB 2/2 und NP 2/2 Partialprüflinge aus der Gesamtfläche des geotextilen Filterelementes entnommen worden. Die visuelle Begutachtung des Probenmaterials erbrachte, wie vor, keine Hinweise hinsichtlich Beschädigung, mikrobieller Prozesse etc. Der in Abb. 4.18 aufgetragene Grad der Bodeneinlagerung in die Vliesstoffe zeigt eine etwa um den Faktor 3 größere Einlagerung bei NP 2/2 im Vergleich zu HB 2/2 innerhalb des Einflußbereiches von A_w .

Untersuchungen zur Kornstruktur des Basiserdstoffes

In Anlehnung an das in Kapitel 4.2.2.1 erläuterte Regime der Probenahme des Testsandes nach Versuchsende sind die ermittelten fraktionsbezogenen Größt- und Kleinstwerte der Kornverteilungskurven des Basiserdstoffes in Abb. 4.17 aufgetragen. Im Vergleich zur Korngrößenverteilung während des Einbaus ergibt sich eine sehr gute Konvergenz der dargestellten Verläufe. Veränderungen in der Kornzusammensetzung des Testsandes sind nicht feststellbar. Im Bereich von $d = 0,01$ mm gehen die vorhandenen Unterschiede im Absolutwert der Massenanteile derart zurück, daß darstellungstechnisch nur eine Kornverteilungskurve ausgewiesen wird.

-

Die Lagerungsdichten des Basiserdstoffes in den Horizonten „Oben“, „Mitte“, „Unten“ der Grundeinheit bei Versuchsende, bezogen auf den Basiswert ρ_{pr} [%], können Abb. 4.20 entnommen werden. Alle Ausbauwerte von ρ_d bleiben sowohl für HB 2/2 und NP 2/2 unterhalb der Größe zum Zeitpunkt des Einbaus, gestatten aber dennoch die Klassifikation einer „Dichten Lagerung“ des Testsandes.

4.3 UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DES BENETZUNGSWIDERSTANDES

4.3.1 VERSUCHSEINRICHTUNG UND UNTERSUCHUNGSABLAUF

Mit Grundlage der theoretischen Betrachtungen in Kapitel 3 dieser Arbeit -Entwicklung des Modells der Durchströmungswiderstände- und den in Dierickx [0] und Rollin et al. [0] diskutierten Sachverhalten, sollen die Untersuchungen zum Einfluß des Benetzungswiderstandes auf das Wasserdurchlässigkeitsverhalten geosynthetischer Filterelemente weitere Erkenntnisse, speziell zum Verhalten der in den Großversuchen beprobten geotextilen Filtermaterialien, liefern. Hauptziel dieses Teiles der experimentellen Untersuchungen ist es, auf der Angabe von Größenordnungen basierende Aussagen zu Erscheinungsbildern und Prozessen im Zusammenhang mit dem Auftreten material-spezifischer Durchströmungswiderstände geotextiler Filtermaterialien zu formulieren. Als sogenannte Einzeldurchlässigkeit bzw. Einzelwiderstand bildet das Wasserdurchlässigkeitsverhalten des geosynthetischen Filterelementes selbst einen Anteil des Summenparameters der Durchströmungswiderstände.

Versuchseinrichtung

Bestandteile des in Abb. 4.22 dargestellten Versuchsaufbaus zur Durchführung der Testreihen sind ein höhenverstellbarer Hochbehälter mit Zulaufleitung und spezieller Wasseraustrittsvorrichtung, ein Acrylglaszylinder mit Millimeterscala, ein Auslaufbehältnis und ein Spiegel. Der Innendurchmesser des Acrylglaszylinders beträgt 94 mm. An der Unterseite des Zylinders ist der Prüfling mittels Kunststoffdichtung an einem Flansch befestigt. Eine Unterstützung des mit Geotextil für den Versuch vorbereiteten Zylinders erfolgt außerhalb der Prüffläche im Flanschbereich. Alle Medien, die in unmittelbarem Kontakt mit dem Prüfling vor und während des Versuches stehen, sind aus Kunststoff gefertigt, um eine Beeinflussung der physikalischen Verhältnisse im System zu minimieren.

Untersuchungsablauf

Durch eine Kalibrierung der Versuchseinrichtung wird der erforderliche hydraulische Höhenunterschied des Hochbehälters zur Gewährleistung einer Steiggeschwindigkeit der Prüfflüssigkeit -destilliertes Wasser versetzt mit fluoreszierendem Natrium- im Zylinder von $1,0 \text{ cm/min} \pm 2 \text{ mm}$ in einem Nullversuch ermittelt. Die Temperatur der Prüfflüssigkeit ist auf $20 \pm 2 \text{ °C}$ eingestellt. Gleiches gilt für die Lagerung der vorbereiteten Prü fzylinder mit Geotextil. Während des Versuches erleichtert der unterhalb des Prüflings im Auslaufbehältnis liegende Spiegel die Bestimmung des Zeitpunktes eines Flüssigkeitsdurchtrittes. Mit dem Öffnen des Zulaufhahnes am Hochbehälter läuft das Testfluid an der Innenseite des Zylinders nach unten, bis es auf den Prüfling trifft. Ein Auftreffen einzelner Tropfen im freien Fall würde zu Durchschlagvorgängen führen und die reale hydraulische Belastung des Prüflings in-situ nicht wiedergeben.

Neben der Aufnahme der Versuchszeiten und Temperaturverhältnisse jedes Einzelversuches wird die bis zum ableitewirksamen Flüssigkeitsdurchtritt erzielte Steighöhe an der Scala des Acrylzyinders mit einer Genauigkeit von ± 1 mm abgelesen. Parallel erfolgt eine Dokumentation des Verhaltens der Prüfmaterialeien auf der Grundlage visueller Beobachtungen. Der Benetzungswiderstand des Geotextils gilt als überwunden, wenn sich ein stetiger Durchtritt der von oben zugeführten Prüflüssigkeit einstellt. Durchtretende, an der Unterseite des Prüflings haftende und sich nach Größe und Lage nicht weiter verändernde Tropfenbildungen werden nicht als ableitewirksam bewertet. Unmittelbar nach dem Erreichen des Abbruchkriteriums werden die flüssigkeitsableitewirksamen Flächenanteile des Prüflings durch Auflegen einer Folie mit Rastereinteilung bestimmt. Die in Abb. 4.21 dargestellten Momentaufnahmen zeigen auszugsweise während den Versuchen beobachtete Phänomene eines sich im Anfangsstadium befindlichen Wasseraufstaus und eines tropfenförmigen Wasserdurchtrittes durch einen Prüfling. Weitere Angaben zum Untersuchungsablauf sind in Elste/Dettmann (1997) [0] enthalten.

4.3.2 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Mit den zur Durchführung der großmaßstäblichen Laborversuche in der „Weimarer Zelle“ gewählten geosynthetischen Filtermaterialien HB 1 bis 3 und NP 1 und 3 (Tab. 4.1) wurden insgesamt je 20 Einzelversuche zum Benetzungsverhalten gemäß dem unter Abschnitt 4.3.1 aufgeführten Untersuchungsregime gefahren. Darüber hinaus wurden 12 weitere Vliesstoffe mit gleicher Anzahl der Teilprüfungen in das Untersuchungsprogramm aufgenommen, um eine Absicherung der Ergebnisse der Prüfmaterialeien HB 1 - 3 und NP 1 - 3 zu garantieren (siehe hierzu [0]). Ersatzweise mußte für NP 2 mangels Verfügbarkeit ein im Hinblick auf den polymeren Grundwerkstoff (PP), die Verfestigungsart (mechanisch vernadelt) und die wirksame Öffnungsweite ($O_{90, w} = 0,20$ mm) quasi identischer, Vliesstoff NP 2* eingesetzt werden, der ebenfalls in 20 Einzelversuchen beprobt wurde.

Der Ergebnisübersicht in Tab. 4.4 ist zu entnehmen, daß die geotextilen Filtermaterialien durch ein vergleichsweise unterschiedliches Benetzungsverhalten gekennzeichnet sind. Für die Parameter Aufstauhöhe h_{Stau} , ableitewirksame Fläche A_w und Versuchsdauer t sind der Mittelwert der jeweiligen Versuchsreihe sowie der zugehörige Größt- und Kleinstwert in Tab. 4.4 angegeben. Zusätzlich werden durch die Wasserableitekennzeichnung visuelle Beobachtungen während den Versuchsreihen an charakteristischen Durchdringungsbildern und -mustern der Prüffläche dokumentiert.

Bei Betrachtung des einer Durchdringung mit der Prüflüssigkeit entgegengesetzten Widerstandes werden bei den Prüflingen HB 2 und NP 3 Aufstauhöhen von im Mittel 7 bzw. 5 mm, bei HB 3 von 1 mm erreicht. Die Aufstauhöhen von HB 1, NP 1 liegen unterhalb 1 mm, NP 2* läßt keinen Wasseraufstau zu.

Die Anteile der an einer Ableitung des Testfluids über die Gesamtfläche des Prüflings wirksamen Flächen A_w lassen NP 1 und NP 2* hervortreten. Mit einsetzender Flüssigkeitszufuhr saugen sich diese Vliesstoffe über die gesamte Fläche voll, ehe das Fluid nach dem Überwinden des Benetzungswiderstandes, d. h. bei voller Wassersättigung des Vliesstoffes, in exponierten Zonen abfließt. Vergleichbare Mechanismen konnten auch für HB 1 mit der Einschränkung beobachtet werden, daß sich der Prozeß des Vollsaugens bzw. der Wassersättigung nur über kleinen Teilflächen einstellte.

Prüflinge Wufilon P 30	Schichtdicke d [mm]	Flächengewicht m [g/m ²]	Durchlässigkeit k _v (2 kN/m ²) [m/s]
Oberer Bereich, 3-lagig	11,83 11,83 10,65 $\Sigma = 34,23$	1436 1434 1516 $\Sigma = 4387$	$4,8 \cdot 10^{-4}$
Unterer Bereich, 3-lagig	12,25 11,98 12,28 $\Sigma = 36,52$	1900 1821 1763 $\Sigma = 5484$	$5,0 \cdot 10^{-4}$
Unterer Bereich, 1-lagig; verockert	13,32	2353	$2,0 \cdot 10^{-4}$

Tab. 4.3: Durchlässigkeitsuntersuchungen am Material der Sickerwand Wufilon P 30; Entnahmestelle 1

MECHANISCHE FILTERWIRKSAMKEIT		
Bemessungsrichtlinie	Rohrgrabenverfüllung / Wufilon P 30 ¹⁾ bzw. Kriedee 100 ²⁾	Anstehendes / Wufilon P 30 ¹⁾
Richtlinie Tiefenentwässerung DR-A 2014 (1988)	$0,06 \text{ mm}^3 \leq w_{\text{vorh.}} \leq 0,35 \text{ mm}^4$	$0,05 \text{ mm}^3 \leq w_{\text{vorh.}} \leq 0,33 \text{ mm}^4$
Schweizer Geotextilhandbuch SVG (1988)	hydrostat. Filterbelastung ⁴⁾ : $O_{w,\text{vorh.}} \leq 1,262 \text{ mm}$ hydrodyn. Filterbelastung ⁴⁾ : $O_{w,\text{vorh.}} \leq 0,379 \text{ mm}$	hydrostat. Filterbelastung ⁴⁾ : $O_{w,\text{vorh.}} \leq 1,06 \text{ mm}$ hydrodyn. Filterbelastung ⁴⁾ : $O_{w,\text{vorh.}} \leq 0,40 \text{ mm}$
Merkblatt FGSV 535 Wilmsers (1994)	$0,25 \text{ mm}^3 < O_{90,w} \leq 1,26 \text{ mm}^4$	$0,21 \text{ mm}^3 < O_{90,w} \leq 1,06 \text{ mm}^4$
¹⁾ $w_{\text{vorh.}} = 0,16 \text{ mm} \approx O_{w,\text{vorh.}} = O_{90,w}$ ²⁾ $w_{\text{vorh.}} = 0,06 \text{ mm} \approx O_{w,\text{vorh.}} = O_{90,w}$ ³⁾ Kolmationskriterium ⁴⁾ Kriterium gegen Kontakterosion		

HYDRAULISCHE FILTERWIRKSAMKEIT	
Bemessungsrichtlinie	Rohrgrabenverfüllung ³⁾ / Wufilon P 30 ¹⁾ bzw. Kriedee 100 ²⁾ Anstehendes ⁴⁾ / Wufilon P 30 ¹⁾
Richtlinie Tiefenentwässerung DR-A 2014 (1988)	$w_{\text{vorh.}} \geq 0,06 \text{ mm}$
Schweizer Geotextilhandbuch	$k_{\text{vorh.}} \geq 100 \cdot k_{\text{S}}$

Tabelle 4.2 ausgelagert

Tab. 4.4: Ergebnisübersicht zum Benetzungsverhalten der geotextilen Filtermaterialien HB 1-3, NP 1, NP 2* und NP 3

Das Phänomen einer sich im Minimum bereichsweise einstellenden Wassersättigung trat bei HB 2, HB 3 und NP 3 nicht auf. Der Benetzungswiderstand vorgenannter Vliesstoffe ist durch den Aufstau der Prüfflüssigkeit gekennzeichnet, wobei für HB 3 eher von einem Flüssigkeitsfilm zu sprechen ist $-h_{\text{Stau}} = 1 \text{ mm}-$. Der Durchtritt des Fluids stellt sich jeweils im Bereich der gekennzeichneten Fläche A_w in Tab. 4.4 ein und erfolgt bei HB 2 in Form von punktuelltem Tropfen (siehe auch Abb. 4.21). HB 3 und NP 3 leiten das Fluid unterhalb der gesamten überstauten bzw. mit einem Flüssigkeitsfilm überzogenen Teilfläche ab.

Global betrachtet erscheint eine Klassifizierung der untersuchten Vliesstoffe in sich sättigende bzw. „saugende“ und stauende Materialien sinnvoll. Beide Phänomene treten in Abhängigkeit zum jeweiligen Vliesstoff sowohl über die Gesamtfläche als auch nur für Teilflächen auf.

4.4 AUSGRABUNG GEOSYNTHETISCHER FILTERMATERIALIEN

4.4.1 BESCHREIBUNG DER ENTNAHMESTELLEN

Die Überprüfung der Funktionsfähigkeit geotextiler Filtermaterialien anhand von Ausgrabungen praktischer Anwendungsfälle läßt einen weiteren Erkenntniszuwachs zur Kontaktsituation zwischen mineralischen Basiserdstoffen und geosynthetischen Filterelementen erwarten. Aufbauend auf einem in den Jahren 1974-1980 bearbeiteten Forschungsvorhaben [0] u. a. zum Einsatz damals noch als polymere Filtermaterialien bezeichneter geotextiler Filterelemente der ehemaligen Reichsbahn, konnten Ausgrabungen langjährig eingebauter geosynthetischer Filter- und Drainelemente in Entwässerungseinrichtungen des Bahnkörpers vorgenommen werden (ausführliche Dokumentation siehe Grap (1997) [0]).

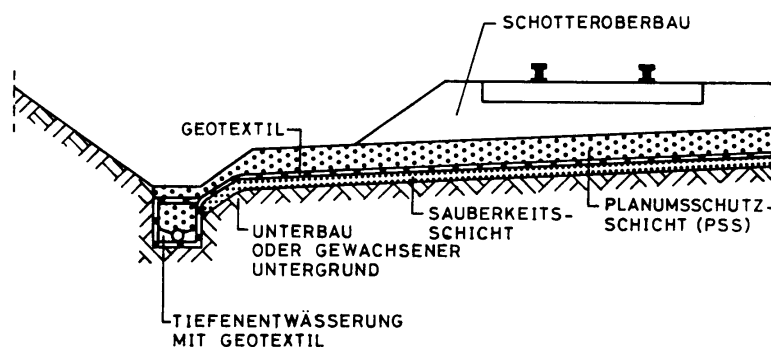


Abb. 4.26: Konstruktionsprinzip von Tiefenentwässerungen entlang des Gleiskörpers (Martinek (1984) in [0])

Im Gleisbau werden Geotextilien, beispielsweise als Flächenfilter- und Trennelement zwischen Schotteroberbau und Eisenbahnunterbau wie in Abb. 4.26 dargestellt, in der Regel jedoch ohne Sauberkeitsschicht eingesetzt. Zur Sammlung und Weiterleitung des zulaufenden Sicker- und/oder Grundwassers sind entlang des Bahnkörpers im Bedarfsfalle Tiefenentwässerungen angeordnet (Abb. 4.26). In diesen können Geotextilien analog der charakteristischen Anwendungsfälle in Abb. 2.1 als Graben- (Filter II nach DR (1988) [0]) oder Rohrfilter (Filter I nach [0]) eingesetzt werden.

Während bisherige Untersuchungsprogramme sich zumeist mit der Entnahme von unterhalb des Schotteroberbaus verlegten geosynthetischen Filter- und Trennelementen beschäftigen

(z. B. [0]) -hydraulische Filterbeanspruchungen nach den Lastfällen I oder II in Abb. 2.5-, gilt das Interesse der hier vorgestellten Feld- und Laboruntersuchungen Entwässerungskonstruktionen entlang des Gleiskörpers. Diese Anwendungsfälle stellen, bei Ausführung eines Grabenfilters oder verwandten Bauweisen, signifikante praktische Anwendungen des in Abb. 3.4 dargestellten Konstruktionsbeispiels mit der hydraulischen Filterbelastung nach Lastfall III in Abb. 2.5 an den Seitenwänden dar.

Zusätzlich kann ein Vergleich dieser Erkenntnisse mit den aus den Großversuchen in der „Weimarer Zelle“ erzielten Ergebnissen gemäß der Grenzfälle 1 und 2 nach Abb. 4.2 sowie den in [0] dargestellten Zusammenhängen bei der Analyse von Schadensfällen (Abschnitt 2.4) erfolgen.

Entnahmestelle 1: Bahnlinie Berlin-Dresden, Abschnitt Walddrehna-Uckro

Die im untersuchten Abschnitt installierte Tiefenentwässerung, Konstruktionsprinzip siehe Abb. 4.27, wurde 1977 im Zuge einer Unterbausanierung im Bereich eines tiefen Geländeeinschnittes ausgeführt und diente u. a. der Erprobung polymerer Filtermaterialien.

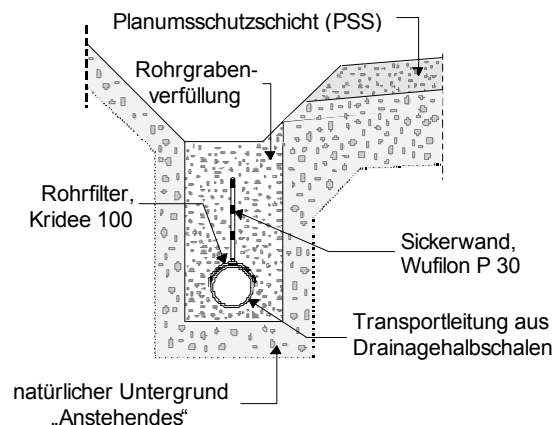


Abb. 4.27: Systemdarstellung der Tiefenentwässerungsanlage an Entnahmestelle 1

Zur Aufnahme von Oberflächen- und Schichtwasser wurden in den mit einer Fräse ausgeschachteten Rohrgraben eine Sickerwand -Filter II: Polyamidvlies Wufilon P 30- eingestellt. Dieses ist an Entnahmestelle 1 aus nicht bekannten Gründen in Richtung des Gleiskörpers versetzt und nicht unmittelbar oberhalb des Rohrscheitels angeordnet. Die Weiterleitung des Drainagewassers erfolgt über ein PVC Halbschalenrohr, dessen untere Halbschale unperforiert, die Deckschale geschlitzt ist. Die geschlitzte Deckschale ist mit einem ebenfalls aus Polyamid gefertigten, chemisch verfestigten Vliesstoff abgedeckt -Filter I: Typ Kridee 100-. Textiltechnische Parameter der eingebauten Filtermaterialien sind in Tab. 4.5 zusammengestellt; beide Produkte sind auf dem Markt nicht mehr verfügbar. Nach Abschluß der Arbeiten wurde der Graben mit örtlich anstehendem Lockergestein -Sande mit geringer Ungleichförmigkeit- verfüllt und die Sickerwand zum Schutz vor Verschlammung mit einer Schicht aus Kies-Sand ($d = 10 \text{ cm}$) überbaut.

Filtertechnisch betrachtet entspricht die Funktionsweise der Sickerwand des Vlieses P 30 den in [0] vorgestellten Ausgrabungen von PGED-Filter- und Drainelementen an Fernverkehrsstraßen in Amerika. Auch die dortigen Untergrundverhältnisse kommen denen der Entnahmestelle 1 sehr nahe.

Abbildung 4.28 ausgelagert

Abb. 4.28: Freilegung geotextiler Filtermaterialien; Versuchsstrecke Berlin-Dresden

Abbildung 4.29 ausgelagert

Abb. 4.29: Freilegung der Tiefenentwässerung; Entnahmestelle 2, Bahnhof Peitz-Ost

In den Jahren 1977, 1978 und 1979 durchgeführte Kontrollen ergaben, trotz bereichsweise aufgetretener Verockerungen und Versinterungen, eine mängelfreie Funktionstüchtigkeit der Anlage. Nach den Ergebnissen der 1978 durchgeführten Überprüfung konnte die Standsicherheit der rutschungsgefährdeten Böschung des Einschnittes (Neigung 1:1-1,5) durch den Einbau der Entwässerungseinrichtung aufrecht erhalten werden. Kritisiert wird in den Berichten nach [0] die zu geringe Volumenstabilität des Vlieses P 30 unter den örtlichen Spannungsverhältnissen.

Zum Zeitpunkt der Ausgrabungen war die Tiefenentwässerung wasserführend. Aufgrund der topographischen Verhältnisse vor Ort und den Ergebnissen einer Streckenbegehung der Entwässerungsanlage kann von einem steten Wasserzulauf zum System ausgegangen werden.

Im Rahmen der Felduntersuchungen (Abb. 4.28) konnten Probenahmen der Sickerwand (Filter II) und des Rohrfilters (Filter I) zur weiteren Untersuchung im Labor erfolgen. Mit den Erkenntnissen der Probenahmen ist festzustellen, daß keine Hohlräume zwischen Basiserdstoff und dem geosynthetischen Filter- bzw. Drainmaterial vorlagen. Das Probenmaterial Wufilon P 30 der Sickerwand wies eine ausgeprägte, tendenziell mit der Tiefe abnehmende Durchwurzelung auf. Die Wurzelbildungen waren am Filter I der Drainageleitung, Vliesstoff Kridee 100, bedingt durch den größten Abstand zur Geländeoberkante, nur abgeschwächt vorhanden.

Vliesstoff	Grundwerkstoff, Verfestigungsart	Flächen- gewicht [g/m ²]	Dicke (2 kN/m ²) [mm]	Öffnungsweite ¹⁾ O ₉₀ [µm]	Wasser- durchlässigkeit k _v (2 kN/m ²) [m/s]
Wufilon P 30	PA, mechanisch vernadelt	1640	11,04	160	1,4 x 10 ⁻²
Kridee 100	PA, chemisch verfestigt	100 ± 10	—	60	8,8 x 10 ⁻⁶
¹⁾ O ₉₀ bestimmt nach dem Hand-Naßsiebverfahren ≈ O _{90, w}					

Tab. 4.5: Textiltechnische Parameter der Filtermaterialien Wufilon P 30 und Kridee 100 (TH Leipzig (1983), DR (1987))

Entnahmestelle 2: Bahnlinie Cottbus-Grunow, Bahnhof Peitz-Ost

Über den Einbauzeitpunkt der an Entnahmestelle 2 untersuchten Tiefenentwässerung (Konstruktion analog Abb. 4.26, jedoch ohne Geotextilabdeckung des Filters I) liegen keine genauen Angaben vor. Nachdem für dortige Versuchsstrecke jedoch Kontrollprüfungen aus 1979 in [0] dokumentiert sind, betrug die Funktionsdauer der Einrichtung im Minimum 18 Jahre. Diese Kontrollprüfungen bescheinigen der Anlage eine volle Funktionsfähigkeit. Zwischenzeitlich ist diese Schienenverbindung stillgelegt und wird nicht mehr genutzt.

Als Filter II des Grabenfilters (Abb. 4.26) im natürlich anstehenden Geschiebemergel bzw. -lehm kam der chemisch verfestigte Polyamid-Vliesstoff Kridee 100 zum Einsatz (Tab. 4.5). Die Ableitung des Drainagewassers erfolgt über ein vollperforiertes Spiraldrainrohr DN 250 (Öffnungsweite 0,6 mm), das in einen einkörnigen Sand eingebettet ist. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen vor Ort führte die Tiefenentwässerung Wasser.

Im Zuge der Ausschachtungsarbeiten zeigten sich teils prägnante Faltenbildungen des geosynthetischen Filters an den Grabenwänden. Diese verhinderten einen innigen Kontakt zwischen dem Basiserdstoff (Geschiebemergel bzw. -lehm) und dem Geotextil im Inneren der Falten, was durch die hier fehlende, sonst aber vorhandene graue bis rötliche Färbung des ursprünglich weißen Textils belegbar ist. Hinweise für nachhaltig negative Verockerungserscheinungen lagen nicht vor.

Während der Probenahme des Vliesstoffes (Abb. 4.29) waren deutliche Festigkeitsunterschiede des Geotextils oberhalb und unterhalb der Wasserlinie erkennbar. Trockene Bereiche des Vlieses wiesen Sprödig- und Brüchigkeit auf, wohingegen im Wasser gelegene Abschnitte sich durch ausgeprägt höhere Festigkeiten auszeichneten.

An der gesamten Grabenwand des geosynthetischen Filters konnte im Kontaktbereich eine wenige Millimeter mächtige Veränderung des Basiserdstoffes festgestellt werden. Diese bestand aus einer deutlich verfestigten Schicht im Kontakt zum Geotextil, die stellenweise plattig vom Filtermaterial ablösbar war. Die Plattenbildungen traten im Bereich der Wasserwechselzone des Systems vermehrt mit einer stark erhöhten Dicke auf und ließen sich nur schwer von der Oberfläche des Geotextils lösen. Bei besonders prägnanter Ausbildung des Phänomens war ein Pendant an der dem Sickermaterial (einkörniger Sand) zugewandten Seite vorhanden. Der Filtervliesstoff unterhalb der im folgenden als „Tonsteinnägel“ bezeichneten Erscheinungen zeigte keine Besonderheiten. Die Ursachen dieser Vorgänge stehen u. a. im Zusammenhang mit dem Herauslösen und Passieren kleiner Aggregate aus dem Basiserdstoff und der Verfestigung zurückbleibender größerer Aggregatzusammenballungen in der Kontaktfläche.

4.4.2 ÜBERPRÜFUNG DER FUNKTIONSFÄHIGKEIT

Auf Grundlage der Beobachtungen während der Feldarbeiten und den Untersuchungen des im Zuge der Ausgrabungen entnommenen Probenmaterials der geosynthetischen Filtermaterialien, des Basiserdstoffes und des Sickerwassers ergeben sich nachfolgend dargestellte Situationen der Entwässerungseinrichtungen (s. a. [0]).

Entnahmestelle 1: Bahnlinie Berlin-Dresden, Abschnitt Walddrehna-Uckro

Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_f der im natürlichen Untergrund anstehenden, enggestuften Sande, liegt nach empirischen Berechnungen (Ansatz von Beyer in [0]) im Bereich von $k_f = 1 - 3 \cdot 10^{-4}$ m/s bei einer Ungleichförmigkeit von $U \approx 2,5$.

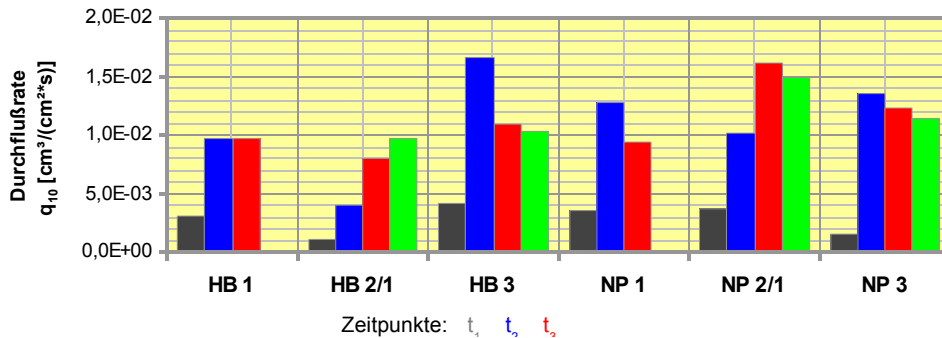
In der Kontaktzone zwischen Sickerwand und Basiserdstoff entnommene Erdstoffproben geben keine Hinweise auf Kontakterosionserscheinungen. Dynamische Einwirkungen des Schienenverkehrs auf die Lagerungsverhältnisse sind mit Basis vorhandener Proctordichten des Anstehenden zwischen 94,5 und 96 % der einfachen Proctordichte, bei $\rho_{pr} = 1,723$ g/cm³, nicht festzustellen.

Der k_f -Wert (empirische Ermittlung aus der Kornverteilungskurve s. o.) der Rohrgrabenverfüllung (Kies-Sand) liegt im unteren Bereich der oben angegebenen Werte des natürlich Anstehenden mit Ungleichförmigkeiten von 3,6 bis 4,6. Die Lagerungsdichte des Kies-Sand Materials ist als „Mitteldicht“ zu klassifizieren.

Die bodenmechanische Untersuchung der Erdstoffproben ergibt sowohl für den natürlich anstehenden Boden als auch das Material der Rohrgrabenverfüllung gute bis sehr gute Entwässerungseigenschaften. Hinweise auf hydraulisch bedingte Umlagerungsprozesse der Kornstrukturen des Anstehenden und der Rohrgrabenverfüllung sind nicht feststellbar. Dies gilt auch für in der Kontaktzone zur Sickerwand entnommene Bodenproben.

Nach Wilmers (1994) und SVG (1988) sind beide Böden als filtertechnisch schwierige Erdstoffe zu klassifizieren.

Chemische Analysen von Bodenproben und entnommenem Sickerwasser, sowohl am Eluat als auch am Feststoff ergaben, daß alle ermittelten Parameter weit unterhalb der nach LAGA (1995) gültigen Grenzwerte liegen, die hydrologischen Verhältnisse somit als



Durchflußrate	HB 1	HB 2/1	HB 3	NP 1	NP 2/1	NP 3
$q_{10}(t_1)$ [cm³/(cm²*s)]	3,0E-03	1,1E-03	4,1E-03	3,6E-03	3,7E-03	1,5E-03
t_1	2 h	2 h 30'	2 h	2 h	3 h 30'	2 h
$q_{10}(t_2)$ [cm³/(cm²*s)]	9,8E-03	4,0E-03	1,7E-02	1,3E-02	1,0E-02	1,4E-02
t_2	4 d	4 d	4 d	4 d	4 d	4 d
$q_{10}(t_3)$ [cm³/(cm²*s)]	9,7E-03	7,9E-03	1,1E-02	9,4E-03	1,6E-02	1,2E-02
t_3	10 d	21 d	20 d	20 d	30 d	25 d
$q_{10}(t_4)$ [cm³/(cm²*s)]	—*)	9,8E-03	1,0E-02	—*)	1,5E-02	1,1E-02
t_4	dto	24 d	31 d	dto	34 d	38 d

*) keine Bestimmung von t als beliebigem Zeitpunkt der Langzeitphase

Abb. 5.1: Durchflußraten q_{10} der Großversuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt -Grenzfall 2-

unbedenklich einzustufen sind.

Die Laboruntersuchungen der entnommenen Geotextilproben beziehen sich vornehmlich auf den Vliesstoff Wufilon P 30 der Sickerwand, weil eine zum Entnahmezustand möglichst unveränderte Situation, besonders der Durchwurzelungserscheinungen, Grundlage der durchgeführten Prüfungen sein sollte. Das Rohrfiltermaterial der geschlitzten Drainagehalbschale -Kridee 100- wurde deshalb lediglich einer visuellen Prüfung unterzogen.

Die Bestimmung der Schichtdicke des Sickerwandmaterials Wufilon P 30 unter der Auflaststufe 2 kPa ergab für alle Proben einen Anstieg von d über den Wert des fabrikneuen Produktes bei gleicher Belastung -Tab. 4.6-. Ursache hierfür können mineralische, organische Einlagerungen und die aufgetretenen Verwurzelungen sein.

Die Flächengewichte der Proben 131-W-1 bis 3 -„oberere“ Abschnitte der Sickerwand Richtung Geländeoberfläche- zeigen im Vergleich zu den „unten“ entnommenen Prüflingen 131-W-4 bis 8 -unten = im Bereich der Aufstandfläche der Sickerwand- deutliche Unterschiede, was auf die in Richtung der Erdschwere wirkende Schleppkraft eingelagerter Bodenpartikel und anderer Substanzen zurückzuführen ist. Zusätzlich waren Verockerungserscheinungen an den Proben W-7 und 8 vorhanden.

Der aufgetretene Massenverlust des für einen normativen Nutzungszeitraum von 20 Jahren vorgesehenen Polyamidvlieses bei Probe 131-W-1 in Tab. 4.6 kann beispielsweise auf Produktionsschwankungen oder den Verlust der Langzeitbeständigkeit des polymeren

Materials gegenüber chemischen und biochemischen Einwirkungsgrößen zurückzuführen sein.

Prüflinge Wufilon P 30	Schichtdicke d [mm]	Flächenmasse m [g/m ²]	Oberflächennahe Durchwurzelung m [g/m ²]
Fabrikneues Produkt	11,04	1640	—
131-W-1 bis 3 (oben)	11,41 ¹⁾ (10,56-11,83) ²⁾	1462 (1434-1516)	46,2 (44,6-48,8)
131-W-4 bis 6 (unten)	12,22 (11,98-12,28)	1823 (1763-1900)	16,8 (6,4-33,1)
131-W-7 (unten)	13,32	2353	35,0
131-W-8 (unten)	12,78	2269	25,8
¹⁾ Mittelwerte der Testreihe; ²⁾ Größt- und Kleinstwerte der Testreihe			

Tab. 4.6: Schichtdicken und Flächengewichte des Probenmaterials Wufilon P 30 der Sickerwand; Entnahmestelle 1

Während der Vorbereitung des Probenmaterials 131-W-8 -Probenmaterial mit deutlichen Ockerbildungen und Verfärbungen- für eine Waschung zur Bestimmung des Grades der Einlagerung von Boden und anderer Substanzen (Tab. 4.7) war auffällig, daß die Einzelfilamente des Vliesstoffes deutlich voneinander getrennt werden konnten. Nachdem die innenliegenden Filamente nahezu keine Bodeneinlagerungen aufwiesen, ist die mechanische Filterwirksamkeit -Bodenrückhaltevermögen- des Sickermaterials als intakt anzusehen. Vor dem Waschen wurden mechanisch entfernbare Anteile durch Kneten und Schütteln von Hand bestimmt -zumeist mineralische Einlagerungen-; Durchwurzelungen wurden nicht entfernt. Der überwiegende Anteil auswaschbarer Substanzen im Inneren wurde von Eisenverbindungen und organogenen Ablagerungen gebildet (Glühverlust 27,9 %).

Probe 131-W-8	Originalprobe	Mechanisch entfernte Einlagerungen	Ausgewaschene Einlagerungen
Flächengewicht [g/m ²]	2269	1990	1492
Masse [g]	181,5	22,3	39,6

Tab. 4.7: Einlagerungsgrad von Boden und anderer Substanzen im Vliesstoff Wufilon P 30 am Beispiel Probe 131-W-8.

Die Feststellung einer eingeschränkten Langzeitbeständigkeit des polymeren Grundwerkstoffes Polyamid wird auch durch die Ergebnisse nach Tab. 4.7 bestätigt und läßt, mit den Resultaten der Untersuchungen der Probe 131-W-1 in Tab. 4.6, Produktionsschwankungen als Ursache des Massenverlustes eher unwahrscheinlich werden.

Die auf und im Vliesstoff vorhandenen Verwurzelungen verschiedener Größen und Wuchsrichtungen haben die Struktur des Materials entscheidend beeinflußt. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Faserstruktur des Vlieses den Wurzelbildungen nahezu keinen Widerstand entgegengesetzt hat. Eine nachhaltige Störung der vertikalen Drain-

funktion des Vliesstoffes ist nicht zu erwarten. Aus statischer Sicht haben die Durchwurzelungen eine Strukturverfestigung des Textils im Sinne einer Bewehrung bewirkt. Ausgewählte Proben des Rohrfiltermaterials Kridee 100 zeigten auch nach dem Waschvorgang noch dunkle Färbungen, was auf eine Anlagerung organischer Substanzen oder Schlackenabrieb des Schienenverkehrs hindeutet. Bedingt durch die Tiefenlage fanden sich nur vergleichsweise kleine Wurzeln. Signifikant verändert und gedehnt war die Struktur des Vliesstoffes über den Kuppen der Welldrainleitung. Bei der Durchführung einfacher Handzugversuche im Labor traten Dehnungen bevorzugt an diesen Stellen auf.

Berechnungen zur Filterstabilität nach DR [0], SVG [0] und Wilmers [0] haben ergeben, daß die Kriterien zur Gewährleistung der mechanischen Filterwirksamkeit in den Grenzflächen mineralischer Basiserdstoff/geosynthetisches Filter- bzw. Drainelement erfüllt sind (Tab. 4.2). Die gute Übereinstimmung der ermittelten Öffnungsweiten des Kontaktersionskriteriums nach DR-A 2014 und dem Schweizer Geotextilhandbuch für hydrodynamische Filterbelastungen ist durch die Nähe des Schienenbetriebes und möglichen dynamischen Einwirkungen hieraus gerechtfertigt.

Das Durchlässigkeits- und Kolmationskriterium zur Gewährleistung der hydraulischen Filterwirksamkeit nach [0] und [0] ist für beide Vliesstoffe nicht eingehalten, wohingegen die Bemessung nach [0] die Einhaltung des Kolmationskriteriums bescheinigt. Die Vorgaben der hydraulischen Filterwirksamkeit, zusammengestellt in Tab. 4.2, sind für das Material der Sickerwand mit $k_{\text{Wufilon P30}} = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ m/s} > k_{\text{Boden}} \cdot 50$ ($k_{\text{Boden}} \approx 1 - 3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$) bei weitem erfüllt. Der Vliesstoff Kridee 100 hingegen weist bereits zum Zeitpunkt des Einbaus eine um mehr als das 10-fache geringere Durchlässigkeit als der Boden des Anstehenden bzw. der Grabenverfüllung auf und dürfte nicht eingesetzt werden.

Nach den Empfehlungen des Schweizer Geotextilhandbuches soll die Wasserdurchlässigkeit des fabrikneuen Geotextils die Wasserdurchlässigkeit der vorliegenden Basiserdstoffe -Anstehendes und Rohrgrabenverfüllung- um den Faktor 100 übersteigen (Tab. 4.2), was ebenfalls nur durch das Sickermaterial Wufilon P 30 erfüllt wird.

$$-k_{\text{Wufilon P30}} = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ m/s} \approx k_{\text{Boden}} \cdot 100-$$

Untersuchungen zur Größe der hydraulischen Belastung des Entwässerungssystems wurden nicht durchgeführt. Die örtliche topographische Situation -Lage der Tiefenentwässerung in einem Geländeeinschnitt- läßt jedoch den Schluß zu, daß für Kornumlagerungsprozesse erforderliche hydraulische Gradienten bei einem böschungsseitigen Wasserzutritt erreicht werden.

Das Wasserdurchlässigkeitsverhalten des Materials Wufilon P 30 wurde in 3 Einzelversuchen bestimmt. Die in Tab. 4.3 zusammengestellten Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche zeigen, daß die in den Vliesstoff eingelagerten Bodenpartikel, Durchwurzelungen und Substanzen zu einer Reduzierung der Durchlässigkeit im Vergleich zum fabrikneuen Produkt um mehr als 1,5 Zehnerpotenzen führen -3-lagige Probenpakete-. Hierbei ist das Flächengewicht der Prüflinge untereinander von scheinbar untergeordneter Bedeutung, wie die Ergebnisse des aus dem „oberen“ und „unteren“ Bereich entnommenen Probenmaterials beweisen. Zusätzliche Verockerungen des einlagig beprobten Abschnittes, ebenfalls aus der Aufstandsfläche der Sickerwand „unten“, setzen die Durchlässigkeit des Vliesstoffes um 2 Zehnerpotenzen herab. Im Gesamtergebnis liegen die bestimmten Durchlässigkeitsbeiwerte k_v im Bereich der Durchlässigkeit der Basiserdstoffe und fallen nicht unter diese ab.

Bemerkenswert ist jedoch, daß die ursprünglich 100-fach größere Durchlässigkeit des fabrikneuen Vliesstoffes P 30 bis auf die Größe der Basiserdstoffe absinkt, obgleich die Empfehlung der Dicke eines zu wählenden geotextilen Filters nach Gl. 2.9 mehr als erfüllt ist:

$$d_{\text{vorh.}} \approx 11,0 \text{ mm} > 25-50 * O_{90,\text{gew.}} = 8,0 \text{ mm.}$$

Die Forderungen nach SVG [0] zur hydraulischen Leistungsfähigkeit eines Geotextils sind somit gerechtfertigt.

Entnahmestelle 2: Bahnlinie Cottbus-Grunow, Bahnhof Peitz-Ost

Der örtlich anstehende Geschiebemergel bzw. -lehm mittlerer Plastizität im natürlichen Untergrund der Entnahmestelle 2 ist, mit Grundlage von Rückrechnungen ausgepegelter Wasserstände im untersuchten Geländeabschnitt, durch einen Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von etwa $k_f = 10^{-7} \text{ m/s}$ gekennzeichnet. Nach [0] liegt mit dem natürlichen Untergrund ein filtertechnisch schwieriger Boden vor.

Mit den schlechten Drainageeigenschaften des Anstehenden kann geschlossen werden, daß die vornehmliche Funktion dieser Tiefenentwässerung in der Ableitung von Oberflächenwässern besteht und der Zufluß aus dem natürlichen Untergrund vergleichsweise gering ist.

Die entnommenen Bodenproben lassen keine Rückschlüsse auf hydraulisch bedingte Instabilitäten der Kornstruktur des Basiserdstoffes erkennen. Anhand ungestörter Erdstoffproben konnte die Lagerungsdichte des natürlichen Untergrundes in Oberflächennähe mit $\rho_d = 1,629$ und $1,656 \text{ g/m}^3$ bestimmt werden. Dies entspricht Proctordichten zwischen 93,0 und 94,5 %. Mit zunehmender Tiefe stieg ρ_d auf $1,856 \text{ g/m}^3 = 106,9 \%$ an.

Der einkörnige Sand des Sickermaterials -Ungleichförmigkeit $U \approx 2$ - zeichnet sich mit einem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von $k_f = 7 - 8 * 10^{-4} \text{ m/s}$ durch gute bis sehr gute Drainageeigenschaften aus. Im Kontaktbereich zu den Öffnungen der Welldrainleitung waren keine Veränderungen der Kornstruktur des Sickermaterials feststellbar.

Das Untersuchungsprogramm der entnommenen Vliesstoffproben an Entnahmestelle 2 wurde, bedingt durch den guten baulichen Zustand der Entwässerungsanlage, auf visuelle Prüfungen der Geotextilproben beschränkt. Bei Betrachtung der Vliesstoffstruktur mit einer Lupe zeigten sich deutliche Unterschiede in den Porengrößen des geotextilen Filters in gedehnten und in Falten gelegener Abschnitte. Während sich Vergrößerungen der Öffnungsweiten gedehnter Vliesstoffe zwangsläufig einstellen (s. a. Saathoff [0]), ist der Anstieg der Porengrößen in Falten gelegener Abschnitte durch ein Herauslösen des chemischen Bindemittels des Geotextils bei vorhandenem alkalischem Wasser in den Hohlräumen der Falten erklärbar. Vorhandene Kolmationserscheinungen des Geotextils sind überwiegend auf eine Anlagerung infolge chemischer und biologischer Prozesse zurückzuführen.

Auf eine Erläuterung zur Entstehung der sogenannten „Tonsteinnägel“ an der Oberfläche des geosynthetischen Filters soll an dieser Stelle, außer mit Hinweis auf die in Kapitel 4.4.1 und in [0] enthaltenen Angaben, verzichtet werden. Filtertechnisch relevant ist unabhängig hiervon die Tatsache, daß die Verfestigungen deutlich niedrigere Durchlässigkeiten als die sie umgebenden Erdstoffe aufweisen und somit zu einer Verminderung der Durchlässigkeit führen.

Die Resultate des chemischen Analyseprogrammes entnommener Erdstoff- und Bodenproben zeigen ebenfalls einen Einfluß der örtlichen Verhältnisse auf die Langzeitbeständigkeit des geotextilen Filtermaterials, ergaben darüber hinaus jedoch keine Anhaltspunkte im Bezug auf die in dieser Arbeit diskutierten Sachverhalte.

Die erforderlichen Nachweise zur Gewährleistung der mechanischen Filterwirksamkeit des Systems an Entnahmestelle 2 (Tab. 4.8) können mit dem eingesetzten Vliesstoff Kridee 100 erfüllt werden. Einschränkungen ergeben sich bei den Berechnungen zur hydraulischen Leistungsfähigkeit des Geotextils. Nach DR [0] ist die Untergrenze der zulässigen

MECHANISCHE FILTERWIRKSAMKEIT		
Bemessungsrichtlinie	Anstehendes / Kridee 10 ^d	Sickermaterial / Drainrohr ²⁾
Richtlinie Tiefenentwässerung DR-A 2014 (1988)	$0,06 \text{ mm}^{3)} \leq w_{\text{vorh.}} \leq 0,2 \text{ mm}^{4)}$	$0,06 \text{ mm} \leq w_{\text{vorh.}} \leq 0,2 \text{ mm}$
Schweizer Geotextilhandbuch SVG (1988)	$O_{w,\text{vorh.}} \leq 0,42 \text{ mm}$	—
Merkblatt FGSV 535 Wilmers (1994)	$0,06 \text{ mm}^{3)} < O_{90,w} \leq 0,30 \text{ mm}^{4)}$	—
¹⁾ $w_{\text{vorh.}} = 0,06 \text{ mm} \approx O_{w,\text{vorh.}} = O_{90,w}$ ²⁾ Öffnungsweite Drainrohr = 0,6 mm ³⁾ Kolmationskriterium ⁴⁾ Kriterium gegen Kontakterosion		

Tab. 4.8: Mechanische Filterwirksamkeit nach unterschiedlichen Bemessungsregeln; Entnahmestelle 2

Öffnungsweite mit $w_{\text{vorh.}} = 0,06 \text{ mm}$ erreicht, die Kriterien in SVG [0] und Wilmers [0], die eine Abminderung der am fabrikneuen Produkt bestimmten Wasserdurchlässigkeit beinhalten, sind bei weitem nicht erfüllt.

Auf eine gesonderte Darstellung der hydraulischen Anforderungen an den geotextilen Filter der Entnahmestelle 2 in Tab. 4.8 soll an dieser Stelle verzichtet werden. Die Bemessungsansätze der in Tab. 4.2 genannten Regelwerke sind sinngemäß und unter Berücksichtigung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes im Anstehenden ($k_{\text{Geschiebemergel}} \approx 10^{-7} \text{ m/s}$) übertragbar.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Tiefenentwässerungssysteme der Entnahmestellen 1 und 2 als für den normativ vorgesehenen Nutzungszeitraum von 20 Jahren funktionsfähig einzustufen sind. Die festgestellten Veränderungen in der Struktur der geotextilen Filtermaterialien, z. B. Massenverlust des polymeren Grundwerkstoffes im Filter- und Drainelement Wufilon P 30 (Tab. 4.7), lassen jedoch erkennen, daß nach Ablauf der projektierten funktionellen Gebrauchsphase von 20 Jahren mit einem Rückgang der Langzeitbeständigkeit zu rechnen ist.

Die Gewährleistung der mechanischen und hydraulischen Wirksamkeit der geosynthetischen Filterelemente im Kontakt mit den Basiserdstoffen als zentrale funktionelle Anforderungen konnte durch beide Systeme erzielt werden. Ein Vergleich unterschiedlicher Bemessungsansätze hat gezeigt, daß rechnerisch ermittelte erforderliche Öffnungsweiten der geosynthetischen Filterelemente nach DR [0] vergleichsweise gut mit den Anforderungen für hydrodynamische Filterbelastungen nach SVG [0] korrespondieren. Dies ist vor dem Hintergrund möglicher dynamischer Einwirkungen des Schienenverkehrs berechtigt. Der Einsatz geotextiler Filtermaterialien größerer Öffnungsweiten zur Steigerung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Systeme wäre dennoch wünschenswert und mit den eher geringen Auswirkungen dynamischer Belastungen auf das schienenparallele Entwässerungssystem an Entnahmestelle 1 belegbar.

Auf die Abminderung der Durchlässigkeit des Geotextils Wufilon P 30 um etwa den Quotienten 100 an Entnahmestelle 1 wird gesondert hingewiesen (Tab. 4.3), auch wenn die Durchlässigkeit des eingebauten Geotextils nicht unter diejenige des Basiserdstoffes abfällt.

5 ERGEBNISANALYSE UND FOLGERUNGEN FÜR DIE PRAXIS

5.1 MODELL DER DURCHSTRÖMUNGSWIDERSTÄNDE

5.1.1 EINFLUSS DER KONTAKTSITUATION AUF DIE FUNKTIONSWEISE

Mit Grundlage der theoretischen Betrachtungen zum Wasserdurchlässigkeitsverhalten im Modell der Durchströmungswiderstände (vgl. Kapitel 3), gestatten die Ergebnisse der großmaßstäblichen Laborversuche in der „Weimarer Zelle“ die Analyse des Einflusses der Kontaktsituation als Einzelwiderstand des Summenparameters der Durchströmungswiderstände auf systemimmanente Funktionsweisen von Filterkonstruktionen mit geosynthetischen Filterelementen.

Aufbauend auf dem in Abb. 3.1 dargestellten Modellierungsverfahren von Durchsickerungs- und Durchströmungsvorgängen mittels Strom- und Potentialliniennetzen, können die Auswirkungen unterschiedlicher Kontaktsituationen nach den Grenzfällen 1 und 2 in Abb. 4.2 dokumentiert und den Fällen a) bis c) in Abb. 3.2 zugeordnet werden. Die indirekte Quantifizierung des Einzelwiderstandes „Kontaktsituation“ analog der Fälle a) bis c) ist bedingt durch die Tatsache, daß es sich hierbei um einen örtlichen Widerstand ohne meßbare Strömungsphase handelt (vgl. Abschnitt 3.2.2).

Für alle nachfolgend dargestellten Strömungs- und Potentialliniennetze gilt, daß zugunsten der Übersichtlichkeit und im Hinblick auf die praktische Nutzbarkeit der Erkenntnisse die Anzahl der Durchflußstreifen und Felder im durchströmten Bodenkörper minimiert wurde. Hieraus resultierende Ungenauigkeiten sind nach Terzaghi/Peck [0] vertretbar und garantieren eine dennoch gute Übereinstimmung mit der realen Situation.

Hydraulisch eingestellter Kontakt -Grenzfall 2-

Die in Abb. 5.2 enthaltenen Strömungs- und Potentialliniennetze der Großversuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt analog Grenzfall 2 (Abb. 4.2) geben die Durchströmungssituation innerhalb der Systeme zum Zeitpunkt t_3 des Zustandes II nach Abb. 4.7 wieder. (Zustand II -quasi-stationäre Verhältnisse, Langzeitphase-). Maßgebende Eingangsgröße der Darstellungen sind die Sickerlinienverläufe zum Zeitpunkt t_3 nach Abb. 4.23. Mit dem Zeitpunkt t_3 ist Phase der sogenannten Filtereinlaufzeit abgeschlossen, es herrscht der für die Funktionsweise während der Langzeitphase charakteristische Gleichgewichtszustand im System vor (Abb. 4.7). Grundlegende Änderungen dieses Gleichgewichtszustandes sind nicht mehr zu erwarten bzw. resultieren nurmehr aus Veränderungen der auf das System einwirkenden Größen (vgl. Abb. 2.7). Diese hätten die Ausbildung eines wiederum neuen Gleichgewichtszustandes zur Folge.

In einem ersten Schritt wird der Summenparameter der Durchströmungswiderstände des jeweiligen Systems durch Angabe des mittleren hydraulischen Gradienten i_m für gedachte vertikale Schnitte in den Meßebenen E_1 bis E_v quantifiziert (Abb. 5.2). Mit dem nach [0] in [0] abgeminderten Wasserdurchlässigkeitsbeiwert des Basiserdstoffes in horizontaler Richtung ergibt sich dann z. B. nach Gl. 2.1 die zugehörige mittlere Strömungsgeschwindigkeit v_m . Datengrundlage der Abminderung von k_f ist der mit Basis des empirischen Ansatzes nach [0] ermittelte Durchlässigkeitsbeiwert des Testsandes jedes Großversuches. Zahlenwerte zur Größe von $Q_{HB „i“}$ bzw. $Q_{NP „i“}$ sowie $A_{w HB „i“}$ bzw. $A_{w NP „i“}$, die nicht in Abb. 5.2 enthalten sind, können Abb. 4.10 und Abb. 4.14 entnommen werden. Im Hinblick auf die Unabhängigkeit vom Zahlenwert des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes des Basiserdstoffes bei der Bestimmung der hydraulischen Gefälleverhältnisse im durchströmten Bodenkörper, sollen vorzugsweise die mittleren hydraulischen Gradienten i_m Basis dieses Teiles der Ergebnisanalyse sein.

Abbildung 5.1 a ausgelagert

Abb. 5.2 a: Strömungs- und Potentiallinienetze der Großversuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt -Grenzfall 2- im Zustand II, Zeitpunkt t_3 Prüflinge HB 1 bis HB 3

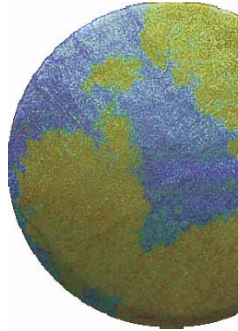


Bild a): Kategorie A / 1,
-teilflächig saugend-

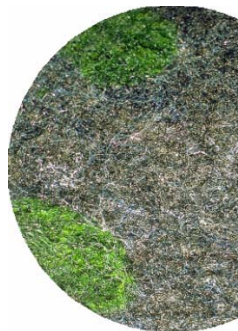


Bild c): Kategorie B / 1,
-teilflächig stauend-

Abb. 5.3:

Vors
chla
g zur
Einte
ilung
des
Bene
tzun
gsve
rhalt
ens
unter
schi
edlic
her
geos
ynth
etisc
her
Filter
mate
rialie
n

Abbildung 5.1 b ausgelagert

Abb. 5.2 b: Strömungs- und Potentiallinienetze der Großversuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt -Grenzfall 2- im Zustand II, Zeitpunkt t3 Prüflinge NP 1 bis NP 3

Unter sonst gleichen Bedingungen stellt sich bei allen Systemen erwartungsgemäß eine Zunahme des hydraulischen Gradienten in Richtung des geosynthetischen Filterelementes ein. Die Erhöhung von i_m entspricht für HB 2/1 einem Faktor von 2,1 und erreicht bei NP 2/1 ein Maximum mit dem Faktor 5,2 zwischen den Meßebenen E_I und E_V (Bilder b) und e) in Abb. 5.2). Die hydraulischen Gradienten aller weiteren Systeme steigen über die gleiche horizontale Durchströmungslänge um das 3- bis 4-fache an.

Allen Versuchen gemein ist, daß der mittlere hydraulische Gradient i_m bis zum Erreichen der Piezometermeßstellen in Ebene E_{III} < 1 bleibt. Oben genannte Unterschiede in der Zunahme von i_m sind demzufolge vornehmlich dem Anströmbereich der geosynthetischen Filterelemente zwischen den Meßebenen E_{III} und E_V zuzuordnen. Mit dem Maximalwert von $i_m = 3,20$ in Ebene E_V bei NP 2/1 kann geschlossen werden, daß das Wasserdurchlässigkeitsverhalten aller Systeme durch laminare Strömungsvorgänge gekennzeichnet, der Modellierungsansatz mittels Strom- und Potentialliniennetzen somit zulässig ist (s. a. Ludewig (1965)). Der im Anströmbereich der Geotextilien eher große Druckverlust mit $\max i_m = 3,20$ bei NP 2/1 deutet auf Anströmungsverhältnisse näherungsweise mit der Wirkung eines vertikalen Brunnens vergleichbar hin (s. a. Geiseler (1967)).

Tendenziell zeigt sich, daß die Größe der wasserableitewirksamen Filterflächen A_w der Prüflinge HB 1 - 3 und NP 1 zum Zeitpunkt t_3 der Langzeitphase jene von NP 2/1 und NP 3 übersteigen, was durch die in Abb. 4.14 enthaltenen Absolutwerte von A_w belegt werden kann. Vorgenannte Unterschiede in der Ausbildung von A_w zur Quantifizierung der Größe des Summenparameters der Durchströmungswiderstände werden auch bei Betrachtung des Verlaufes der Stromlinien und zugehörigem Potentialabbau im unmittelbaren Anströmbereich der Prüflinge offenbar. Mögliche Ursachen dieser Verhältnisse werden unter Abschnitt 5.1.2 diskutiert.

Als Parameter, mit im Vergleich zu A_w ungleich größerer Bedeutung für das Systemverhalten, hat die in Abb. 5.1 aufgetragene Entwicklung der flächenbezogenen Durchflußrate q_{10} [$\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] zu gelten. Diese ergibt sich aus dem Quotienten der absoluten Durchflußwassermengen nach Abb. 4.10 und dem zugehörigen Betrag von A_w des gleichen Zeitpunktes in Abb. 4.14. Ergänzend zu den in Abb. 5.2 dargestellten Strömungs- und Potentialliniennetzen, die die Verhältnisse zum Beginn der Langzeitphase -Zeitpunkt t_3 - wiedergeben, gestattet q_{10} die Betrachtung der gesamten Versuchsdauer incl. der Filtereinlaufzeit, die durch ständig wechselnde Gleichgewichtszustände innerhalb der Systeme gekennzeichnet ist (vgl. Abb. 4.7).

Für die Durchflußraten der Zeitpunkte t_1 und t_2 in Abb. 5.1 werden die Auswirkungen ständiger Veränderungen im Wasserdurchlässigkeitsverhalten der Systeme signifikant gegenwärtig. Dies hat insbesondere für den Zeitpunkt t_2 zu gelten. Während q_{10} zum Zeitpunkt t_2 für HB 3, NP 1 und NP 3 den Wert der Langzeitphase übersteigt, ist bei HB 2/1 und NP 2/1 ein sukzessiver Anstieg des Wasserableitevermögens bis hin zur Langzeitphase erkennbar. Die Absolutwerte von $q_{10}(t_2)$ und $q_{10}(t_3)$ bei HB 1 sind nahezu identisch. Rückschlüsse auf einen Einfluß der wirksamen Öffnungsweite O_{90} oder anderer Kenngrößen bzw. Eigenschaften der Prüflinge nach Tab. 4.1 als Ursache dieser Verläufe beschränken sich auf die Feststellung, daß entsprechend Abb. 4.3 vorh. O_{90} für HB 2/1 und NP 2/1 $\approx \min O_{90}$ ist. Des weiteren können Bemessungsfehler ausgeschlossen werden.

Bei Betrachtung der zeitlichen Ausdehnung der Filtereinlaufzeit in Abb. 5.1 fällt auf, daß die Stabilisierung der Systeme mit den Prüflingen NP 2/1 und NP 3 (30 d und 25 d) bis zum Zeitpunkt t_3 im Vergleich zu HB 2/1, HB 3 und NP 1 (21 d, 20 d und 20 d) einen deutlich längeren Zeitraum in Anspruch nimmt, wohingegen die Lage der Zeitpunkte t_1 und t_2 eine gute Übereinstimmung aufweist. Die Dauer der Filtereinlaufzeit bei HB 1 von nur 10 Tagen

ist darüber hinaus als gesichert anzusehen, weil aufgrund des Versuchsverlaufes aller anderen Systeme geschlossen werden kann, daß eine grundsätzliche Änderung im Wasserdurchlässigkeitsverhalten nicht zu erwarten ist und HB 1 deshalb den Systemen mit kürzerer Filtereinlaufzeit zugeordnet werden kann.

Die bereits im Zusammenhang mit der Größe der wasserableitewirksamen Filterfläche A_w zum Zeitpunkt t_3 in Abb. 5.2 bzw. Abb. 4.14 aufgezeigte Tendenz eines sehr ähnlichen Verhaltens der Prüflinge HB 1 bis 3 und NP 1 findet ihre Fortsetzung in den zur Stabilisierung der Durchströmungsverhältnisse erforderlichen Zeiträumen, die durch das Ende der Filtereinlaufzeit -Abschluß der Phase ständig wechselnder Gleichgewichtszustände im System; Zustand I nach Abb. 4.7- mit dem Zeitpunkt t_3 repräsentiert werden.

Die für die Leistungsfähigkeit der Systeme bedeutsamen Absolutwerte des Wasserableitvermögens q_{10} im Zustand II variieren über die gesamte Versuchsreihe zwischen dem Kleinstwert bei HB 2/1 und dem Größtwert bei NP 2/1 mit einem Faktor von 2,0 zum Beginn der Langzeitphase (Zeitpunkt t_3) und werden im weiteren Verlauf der Ergebnisanalyse unter den Abschnitten 5.2 und 5.3 bewertet.

Vollflächiger Kontakt in der Grenzfläche -Grenzfall 1-

Dem Modellierungsansatz der Versuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt folgend, enthält Abb. 5.4 die Strömungs- und Potentialliniennetze der Versuche HB 2/2 und NP 2/2 des Zeitpunktes t_3 der Langzeitphase -vollflächiger Kontakt zwischen Basiserdstoff und geosynthetischem Filter gemäß Grenzfall 1 in Abb. 4.2-. Datengrundlage der in Abb. 5.4 enthaltenen Darstellungen sind wiederum die Sickerordinaten des Zeitpunktes t_3 , die Abb. 4.25

Abbildung 5.3 ausgelagert

Abb. 5.4: Strömungs- und Potentiallinienetze der Großversuche mit vollflächigem Kontakt im Zuge des Einbaus -Grenzfall 1- Zustand II, Zeitpunkt t_3 Prüflinge HB 2/2 und NP 2/2

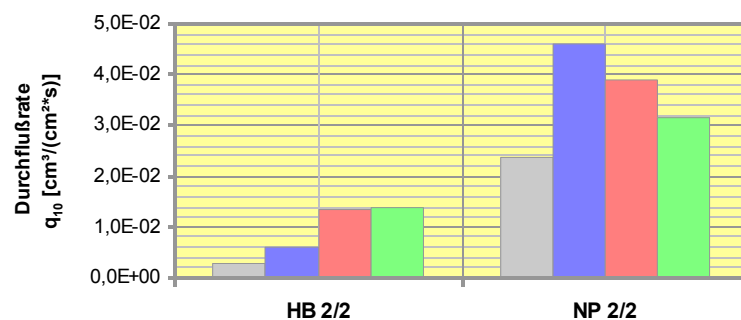
Zeitpunkte: t_1 t_2 t_3

entnommen sind. Das bezüglich des Systemverhaltens in den Zuständen I und II nach Abb. 4.7 Gesagte -ständig wechselnde Gleichgewichtssituationen im System- behält, unter Beachtung der Merkmale des Systemverhaltens der Versuche gemäß Grenzfall 1, weiterhin Gültigkeit (vgl. Abschnitt 4.2.3.2).

Die erwartungsgemäße Zunahme des hydraulischen Gradienten i_m stellt sich, wie vor, auch für die Systeme HB 2/2 und NP 2/2 ein und entspricht bei HB 2/2 dem Faktor 5,0; für NP 2/2 einem Faktor von 4,3 zwischen den Meßebenen E_I und E_V .

Während die Zunahme des hydraulischen Gefälles im System HB 2/2 vornehmlich im gedachten vertikalen Schnitt durch die Meßebene E_{II} einsetzt, verläuft dieser Anstieg bei NP 2/2 stetiger und ist über die gesamte Länge des durchströmten Bodenkörpers verteilt. Beleg hierfür ist die Tatsache, daß i_m bei NP 2/2 im Vergleich zu HB 2/2 nur in Meßebene E_I unter 1 bleibt und in E_{II} bereits darüber liegt. Der Maximalwert von $i_m = 3,31$ bei NP 2/2 ist auch hier als Nachweis laminarer Strömungsverhältnisse in den durchströmten Bodenkörpern anzusehen.

Signifikante Unterschiede im Durchsickerungsverhalten der Systeme zum Zeitpunkt t_3 nach Abb. 5.4 ergeben sich bei Betrachtung der Ausbildung der wasserableitewirksamen Filterflächen A_w (Zahlenwerte siehe Abb. 4.19). Die um ein Mehrfaches größere Fläche von A_w in der Kontaktebene bei HB 2/2 läßt auf ein scheinbar größeres Wasserableitevermögen im Vergleich zu NP 2/1 schließen.



Durchflußrate	HB 2/2	NP 2/2
$q_{10}(t_1)$ [cm³/(cm²*s)]	2,8E-03	2,4E-02
t_1	2 h	3 h 30'
$q_{10}(t_2)$ [cm³/(cm²*s)]	6,0E-03	4,6E-02
t_2	3 d	2 d
$q_{10}(t_3)$ [cm³/(cm²*s)]	1,3E-02	3,9E-02
t_3	21 d	31 d
$q_{10}(t_4)$ [cm³/(cm²*s)]	1,4E-02	3,1E-02
t_4	25 d	34 d

Abb. 5.5: Durchflußraten q_{10} der Großversuche mit vollflächigem Kontakt im Zuge des Einbaus -Grenzfall 1-

Dieser Rückschluß erweist sich mit Basis der in Abb. 5.5 dargestellten Durchflußraten q_{10} über die gesamte Versuchsdauer als grundlegend falsch. Trotz weitaus größerem Absolutbetrag von A_w erreicht die Wasserdurchflußrate von HB 2/2 zu keinem Zeitpunkt die Größe von q_{10} für NP 2/2 (Zahlenwerte der Durchflußwassermengen Q_{10} nach Abb. 4.16). Die Forderung, eine freie Ausbildung der Sickerlinie durch die Untersuchungsrandbedingungen

im durchströmten Bodenkörper zu garantieren, erweist sich spätestens jetzt als in vollem Umfang gerechtfertigt (vgl. Abschnitt 3.2.2). Eine Diskussion der Absolutwerte von q_{10} hinsichtlich Leistungsfähigkeit etc. der Systeme wird unter Abschnitt 5.2 und 5.3 vorgenommen.

Als Ursache dieser voneinander abweichenden Verhaltensweisen können Bemessungsfehler, wie schon für die Großversuche analog Grenzfall 2 in Abb. 4.2, ausgeschlossen werden. Weiterhin ergeben sich keine Zusammenhänge aus den in Tab. 4.1 enthaltenen Parametern und Kenngrößen der geosynthetischen Prüflinge. Die aufgetretenen Phänomene sind somit als Indiz für bislang nicht oder nur unzureichend berücksichtigte Mechanismen und Prozesse zu werten und bestätigen die Notwendigkeit einer kritischen Auseinandersetzung mit der gegenwärtigen Untersuchungspraxis zur Abbildung geokunststoffgerechter Prüfbedingungen (vgl. Abschnitt 2.3.3 -Filtereinlaufzeit- und Abschnitt 2.5).

Die zur Stabilisierung der Filterkonstruktionen erforderlichen Zeiträume der Filtereinlaufzeit hingegen korrespondieren gut mit den in Abb. 5.1 enthaltenen Angaben und erlauben mit 21 bzw. 31 d eine sinngemäße Zuordnung der Systeme HB 2/2 und NP 2/2 zur Kategorie kürzerer und längerer Stabilisierungsphasen. Feststellbar ist weiterhin eine geringfügige Verschiebung der Zeitpunkte t_1 und t_2 mit der Tendenz zur Verkürzung der Phase sogenannter differenter Prozesse des Zustandes I (vgl. Abschnitte 4.2.2.2 und 4.2.3.2).

Vergleich der Kontaktsituationen

Die Analyse des Einflusses der Kontaktsituation auf die Funktionsweise analog der Grenzfälle 1 und 2 in Abb. 4.2 basiert auf der vergleichenden Betrachtung der Strömungs- und Potentialliniennetze der Prüflinge HB 2 und NP 2 in Abb. 5.6 die, farblich gekennzeichnet, in überlagerter Form dargestellt sind. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die neuerliche Darstellung der Strömungs- und Potentiallinien mit Ausnahme der Randstromlinie=Sickerlinie (SL) verzichtet. Diese können Abb. 5.2 und Abb. 5.4 entnommen werden.

Als prägnant unterschiedlich fallen die den Grenzfällen 1 und 2 zugehörigen Verläufe der Randstromlinien des Zeitpunktes t_3 zu Beginn der Langzeitphase beider Prüflinge unmittelbar ins Auge. Vorgenannte Unterschiede sind für HB 2 vornehmlich ab Ebene E_{II} festzustellen und treten bei NP 2 bereits ab Ebene E_I zu tage. Innerhalb dieser signifikant unterschiedlichen Zonen im Anströmbereich der geosynthetischen Filterelemente verlaufen die den Bedingungen des Grenzfalles 1 (GF 1) zugehörigen Sickerordinaten grundsätzlich und deutlich unterhalb jenen des Grenzfalles 2 (GF 2).

Bis zur Ausbildung dieser divergenten Verhaltensweise ab Ebene E_{II} für HB 2 und E_I für NP 2 weichen die Randstromlinien der Bilder a) und b) nach Abb. 5.6 im Hinblick auf die sich danach einstellenden Durchströmungsverhältnisse der jeweiligen Prüflinge nur wenig voneinander ab. Tendenziell weist der Krümmungsverlauf jedoch auch schon hier auf ein in Richtung der Kontaktzone voneinander abweichendes Verhalten der Prüflinge unter sonst, die Kontaktsituationen analog GF 1 und 2 ausgenommen, gleichen Bedingungen hin.

Dem unterschiedlichen Durchsickerungsverhalten in Abhängigkeit zur Kontaktsituation folgend, unterscheiden sich die als wasserableitewirksam bezeichneten Filterflächen A_w in der Kontaktebene ebenso prägnant.

Abbildung 5.5 ausgelagert

Abb. 5.6: Durchströmungsverhalten der Prüflinge HB 2 und NP 2 in den Grenzfällen 1 und 2 während der Langzeitphase -Zeitpunkt t_3 -

Eine separate, auf die Einzelversuche bezogene Betrachtung der mittleren hydraulischen Gradienten i_m über die horizontale Durchströmungslänge des Bodenkörpers, kann mit Hinweis auf die bereits diskutierten Sachverhalte entfallen (vgl. auch Abb. 5.2 und Abb. 5.4). Hingegen vermag die auf die Grenzfälle 1 und 2 und die geosynthetischen Prüflinge ausgerichtete Analyse der hydraulischen Gefällesituationen den bereits vorliegenden Erkenntnissen weitere wichtige Aufschlüsse hinzu zufügen. So zeigt sich, daß die durch die hydraulische Einwirkung des Sickerwassers herbeigeführte Kontaktsituation bei HB 2/2, im Vergleich zu HB 2/1, mit deutlich höheren Gradienten i_m in gedachten vertikalen Schnitten der Ebenen E_{III} bis E_V einhergeht, während die Abschnitte im Bereich von E_I und E_{II} eine gute Übereinstimmung zeigen. Die Gradienten i_m der Ebene E_V unterscheiden sich um den Faktor 2,1 (Abb. 5.6).

Die Projektion vorangestellter Betrachtungsweise auf die Durchströmungsverhältnisse von NP 2 liefert die Erkenntnis, daß sich Unterschiede in der Art der herbeigeführten Kontaktsituationen zwischen Basiserdstoff und geosynthetischem Filterelement scheinbar überwiegend in einer Veränderung der Sickerordinaten bei eher gleichbleibenden hydraulischen Gefällen äußern, läßt man die zugehörigen Durchflußraten q_{10} der Versuche in einem ersten Schritt außer Acht.

Als weiteres Indiz für das Vorliegen bislang nicht oder nur unzureichend berücksichtigter Verhaltensweisen geosynthetischer Filterelemente ist bei Gegenüberstellung der Prüflinge HB 2 und NP 2 die Tatsache zu werten, daß die mittleren hydraulischen Gradienten i_m , für HB 2/2, NP 2/1 und NP 2/2, vom jeweiligen Grenzfall unabhängig, innerhalb der gleichen Größenordnung liegen. Im Gegensatz hierzu setzen sich die Gradienten zwischen den Meßebenen E_{III} bis E_V bei HB 2/1 mit in Richtung der Kontaktzone zunehmender Tendenz von den vorgenannten deutlich ab.

Mit Grundlage der bisherigen Erkenntnisse können die Resultate der Untersuchungen zum Wasserdurchlässigkeitsverhalten von Filtersystemen mit Geotextilien in der „Weimarer Zelle“ durch die in Abb. 5.7 dargestellte Grenzfallbetrachtung in Verbindung mit der in Abb. 3.2 enthaltenen Fallunterscheidung in das Modell der Durchströmungswiderstände übertragen werden. Diese Grenzfallbetrachtung gestattet erstmalig eine Quantifizierung des Einflusses der Kontaktsituation auf das Wasserdurchlässigkeitsverhalten von Filtersystemen mit Geotextilien in der Grenzfläche mineralischer Basiserdstoff / geosynthetisches Filterelement.

Die Zuordnung der Auswirkungen unterschiedlicher Kontaktsituationen zu Fall c) nach Abb. 3.2 im Modell der Durchströmungswiderstände ergibt sich durch die in den Großversuchen ermittelten Sickerordinaten zum Zeitpunkt t_3 (Abb. 5.6) analog der Grenzfälle 1 und 2 nach Abb. 4.2. Im Zusammenhang mit den in Abb. 5.7 ebenfalls enthaltenen Absolutwerten der wasserableitewirksamen Filterflächen A_w und der Durchflußwassermengen Q_{10} des Zeitpunktes t_3 folgt weiter, daß sich die Beträge von A_w bei NP 2/1 und 2/2 um einen Faktor 2,5 für die Grenzfälle 1 und 2 unterscheiden, während die Durchflußwassermengen im Verhältnis 1 : 1,1 ($Q_{10\ GF\ 1} : Q_{10\ GF\ 2}$) zueinander stehen. Für HB 2/1 und HB 2/2 ist eine grundsätzlich gleiche Entwicklung mit dem Faktor 2,0 zwischen $A_{w\ GF\ 1}$ und $A_{w\ GF\ 2}$, sowie dem Verhältnis 1 : 1,2 ($Q_{10\ GF\ 1} : Q_{10\ GF\ 2}$) der Durchflußwassermengen Q_{10} zu registrieren. Diese jedoch ist, im Hinblick auf das Niveau der Absolutwerte von A_w , bei NP 2 und HB 2 einer anderen Wertigkeitsebene zuzuordnen und durch den Einfluß bislang nicht oder nur unzureichend berücksichtigter Mechanismen und Prozesse bedingt.

Das nach Abb. 5.7 analysierte Wasserdurchlässigkeitsverhalten der untersuchten geosynthetischen Filterelemente schlägt sich folgerichtig auch im Verlauf der Durchflußraten q_{10} in Abb. 5.8 nieder. Die zu allen Versuchsphasen größte Wasserableitekapazität herrscht für

Abbildung 5.6 ausgelagert

Abb. 5.7: Zuordnung des Kontaktverhaltens von Filtersystemen mit Geotextilien auf Grundlage einer Grenzfallbetrachtung

Abbildung 5.7 ausgelagert

Abb. 5.8: Gegenüberstellung des Verlaufes der Durchflußraten der Prüflinge NP 2 und HB 2 nach Kontaktbedingungen gemäß Grenzfall 1 und 2

den Grenzfall 1 bei NP 2/1 vor. Nach Kontaktverhältnissen analog Grenzfall 2 tritt bei NP 2 eine Reduzierung des Ableitevermögens im Verhältnis 1 : 0,42 zum Zeitpunkt t_3 bzw. 1 : 0,47 für t_4 während der Langzeitphase ein. Einen qualitativ gleichen Verlauf nimmt die Entwicklung der Durchflußrate bei HB 2 im Vergleich des Ableitevermögens der Grenzfälle 1 und 2 mit den Verhältnissen 1 : 0,59 für t_3 und 1 : 0,70 für t_4 . Ausgehend von den Betrachtungen der Erhöhung des Durchströmungswiderstandes in der Kontaktzone und dem unterschiedlichen Niveau der Absolutwerte von A_w bei gleichzeitig unterproportionalem Anstieg von Q_{10} , äußern sich die Unterschiede im Wasserdurchlässigkeitsverhalten von HB 2 und NP 2 bei Berechnung der Durchflußraten derart, daß q_{10} für HB 2/2, selbst unter den Kontaktbedingungen des Grenzfalles 1 -vollflächiger Kontakt-, die Absolutwerte von q_{10} bei NP 2/1 des Grenzfalles 2 -Hohlraum in der Grenzfläche- der Zeitpunkte t_3 und t_4 nicht ganz erreicht.

Als erste Zwischenbilanz kann mit Basis der Analyse von Untersuchungen unterschiedlicher Kontaktsituationen in der „Weimarer Zelle“ resumiert werden:

- ⇒ Die Abstraktion unterschiedlicher Kontaktverhältnisse im Modell der Durchströmungswiderstände äußert sich zwischen den Grenzfällen 1 und 2 vornehmlich in einer Erhöhung des Durchströmungswiderstandes in der Kontaktzone durch Zunahme der wasserableitewirksamen Filterfläche A_w und nicht proportionalem Anstieg der zugehörigen Wasserdurchflußmengen Q_{10} (Abb. 5.7).
- ⇒ Die Erhöhung des Durchströmungswiderstandes in der Kontaktebene als Einzelwiderstand des Summenparameters der Durchströmungswiderstände bei hydraulisch eingestelltem Kontakt entspricht, bezogen auf die Wasserdurchflußrate q_{10} des jeweiligen geosynthetischen Filterelementes, einem Faktor von bis zu 2,1 (Abb. 5.8).
- ⇒ Unter sonst gleichen Bedingungen zeigt sich, daß das Wasserdurchlässigkeitsverhalten verschiedener geosynthetischer Filterelemente über die Erhöhung des Durchströmungswiderstandes in der Kontaktzone hinaus von bislang nicht oder nur unzureichend berücksichtigten Mechanismen beeinflusst wird. Beleg hierfür sind die Durchflußraten q_{10} zweier Geotextilien, die, trotz unterschiedlicher Kontaktsituation gemäß Grenzfall 1 und 2, ein nahezu gleich großes Wasserableitevermögen während der Langzeitphase aufweisen (Abb. 5.8). Der Notwendigkeit einer kritischen Auseinandersetzung mit der gegenwärtigen Untersuchungspraxis wird hiermit Nachdruck verliehen.
- ⇒ Die mit Basis der Konstruktion von Strom- und Potentialliniennetzen ermittelten mittleren hydraulischen Gradienten im Anströmbereich lassen auf vorwiegend laminare Strömungsverhältnisse im durchströmten Bodenkörper schließen, wodurch der Ansatz des Gesetzes von Darcy zur Quantifizierung des Systemverhaltens im Modell der Durchströmungswiderstände zulässig ist (Abb. 5.2 und Abb. 5.4).
- ⇒ Mit dem entwickelten modifizierten Modell zur Funktionsweise von Filtersystemen mit Geotextilien und den Großversuchen in der „Weimarer Zelle“ kann nach vorliegendem Kenntnisstand erstmalig eine Quantifizierung des Einflusses der Kontaktsituation auf das Wasserdurchlässigkeitsverhalten dieser Filterkonstruktionen vorgenommen werden.

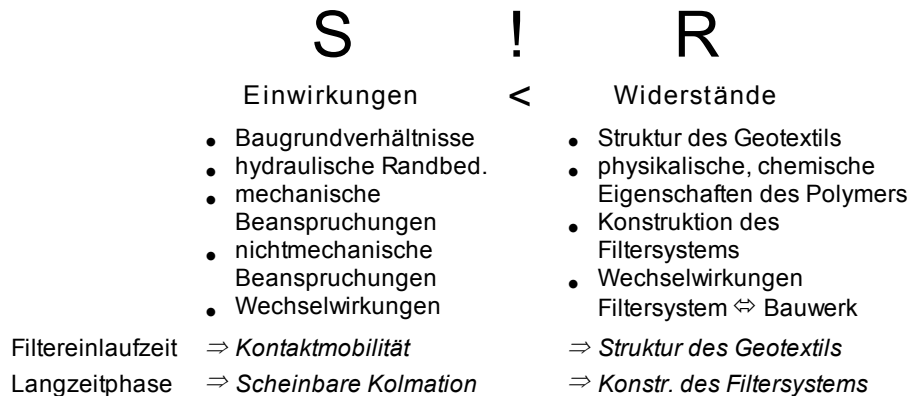


Abb. 5.9: Einfluß vom Ideal-Zustand abweichender Kontaktverhältnisse auf Einwirkungen und Widerstände bei Filtersystemen mit Geotextilien

5.1.2 WASSERDURCHLÄSSIGKEITSVERHALTEN UNTERSCHIEDLICHER GEOTEXTILIEN

Die Ergebnisse der Benetzungsuntersuchungen der geosynthetischen Filtermaterialien HB 1 bis 3 und NP 1, NP 2* und NP 3 in Tab. 4.4 und Abschnitt 4.3.2 aufgreifend, werden in diesem Teil der Ergebnisanalyse die Einflüsse werkstoffbedingter Durchströmungswiderstände auf das Wasserdurchlässigkeitsverhalten einer näheren Betrachtung unterzogen. Innerhalb des Modells der Durchströmungswiderstände ist das Auftreten vorgenannter Phänomene als weiterer Einzelwiderstand des Summenparameters der Durchströmungswiderstände gemäß Abschnitt 3.2.2 relevant.

Aus der Ergebniszusammenstellung in Tab. 4.4 kann gefolgert werden, daß der einer Durchdringung mit einer Flüssigkeit entgegengesetzte Widerstand der unterschiedlichen geosynthetischen Prüflinge, repräsentiert durch das Benetzungsverhalten, eine globale Einteilung in Geotextilien -im Sinne von Vliesstoffen- mit und ohne Aufstau ermöglicht. Vorgenannte Erkenntnisse bestätigen somit die Erfahrungen von Dierickx [0] und Rollin et al. in [0]. Es kann weiter präzisiert werden, daß im Falle eines Aufstaus, dieser sowohl im Bereich von Teilflächen, als auch vollflächig zu Tage tritt (Abb. 4.21). Geotextilien „ohne Aufstau“ zeigen darüber hinaus die Verhaltensweise, sich vor dem Überwinden des Benetzungswiderstandes bei Flüssigkeitszutritt, dem Prozeß einer Wassersättigung vergleichbar, vollzusaugen. Vorgenannter Prozeß des Vollaugens tritt, wie zuvor das Phänomen des Aufstaus, wiederum teilflächig oder über die gesamte Fläche auf (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Mit Grundlage der beobachteten Phänomene vor und während des Flüssigkeitsdurchtrittes durch die Vliesstoffe läßt sich der in Abb. 5.3 dargestellte Vorschlag zur Einteilung des Benetzungsverhaltens unterschiedlicher geosynthetischer Filtermaterialien entwickeln. Das durch die Kategorien A -„saugende Vliesstoffe“- und B -„stauende Vliesstoffe“- charakterisierte Benetzungsverhalten wird durch die Unterkategorien A/1, A/2 bzw. B/1 und B/2 weiter detailliert. Hierbei stehen die Ziffern 1 und 2 für die flächenbezogene Ausdehnung des jeweiligen Phänomens „teilflächig“ bzw. „vollflächig“. Durch die den Kategorien in Abb. 5.3 zugeordneten charakteristischen Erscheinungsbilder a) bis d) der Phänomene werden die Beobachtungen während der Versuchsreihen als Basis des Einteilungsvorschlages zusätzlich konkretisiert. Die in Abb. 5.3 vorgenommene Einteilung der in der „Weimarer Zelle“ untersuchten geosynthetischen Vliesstoffe, ist mit Grundlage der in Elste/Dettmann [0] enthaltenen Untersuchungsergebnisse als für Vliesstoffe repräsentativ anzusehen. Ordnet

man diese den Kategorien nach Abb. 5.3 zu, so ergeben sich die in Tab. 5.1 zusammengestellten Sachverhalte.

Aus der in Tab. 5.1 enthaltenen Zuordnung von HB 1 - 3 und NP 1 - 3 lässt sich ableiten, daß eine globale Unterscheidung der aufgetretenen Phänomene „Aufstau“ und „Vollsaugen“, ausschließlich begründet in der Art der Verfestigung oder anderen konventionellen geotextiltechnischen Kenngrößen der Vliesstoffe, nicht möglich ist. Es zeigt sich jedoch die Tendenz, daß die Gruppe der „HB-Filterelemente“ zum Auftreten eines Aufstaus als Erscheinungsbild des Benetzungswiderstandes neigt -HB 2 und 3-, wohingegen sich die „NP-Gruppe“ eher durch das Auftreten des Prozesses Vollsaugen kennzeichnet -NP 1 und 2-. Die Zugehörigkeit der Vliesstoffe HB 1 und NP 3 zu den Kategorien A/1 bzw. B/1 ist Beleg für die Tatsache, daß oben genannte globale Unterscheidung der Geotextilien nicht möglich ist.

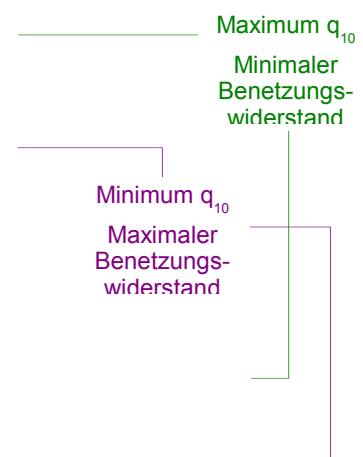
Mit den Kategorien A/2 -vollflächig saugend- und B/2 -vollflächig stauend- der Vliesstoffe HB 2 bzw. NP 1 und NP 2 stellen sich darüber hinaus Extremzuständen vergleichbare Verhältnisse der Prozesse „Aufstau“ bzw. „Vollsaugen“ ein. Das Benetzungsverhalten der Vliesstoffe HB 1, HB 3 und NP 3 wird mit der in Tab. 5.1 enthaltenen Einteilung Teilzuständen zugeordnet.

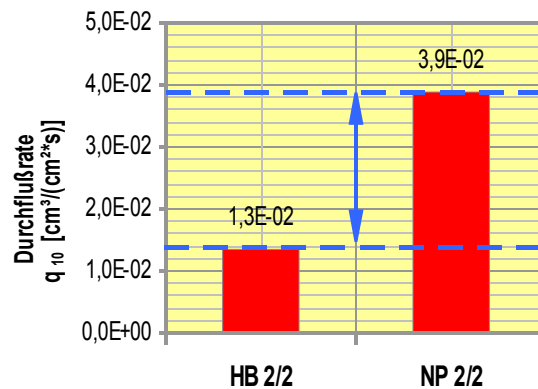
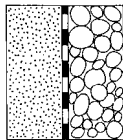
Prüfling	HB 1	HB 2	HB 3	NP 1	NP 2	NP 3
Benetzungs-Kategorie	A / 1	B / 2	B / 1	A / 2	A / 2	B / 1

Tab. 5.1: Zuordnung des Benetzungsverhaltens der geosynthetischen Filterelemente HB 1 bis 3 und NP 1 bis 3 zu Kategorien

Überträgt man in einem nächsten Schritt die den Vliesstoffen charakteristischen Benetzungseigenschaften auf das Wasserdurchlässigkeitsverhalten der Großversuche in der „Weimarer Zelle“, resultiert hieraus der in Abb. 5.10 dargestellte Zusammenhang zwischen dem Benetzungswiderstand und der Wasserdurchflußrate q_{10} . Getrennt in die Untersuchungen der Grenzfälle 1 und 2 sind in Abb. 5.10 die Durchflußraten q_{10} der Großversuche zum Zeitpunkt t_3 des Zustandes II nach Abb. 4.7 -Beginn der Langzeitphase- aufgetragen. Zusätzlich gekennzeichnet sind die Maximal- und Minimalwerte von q_{10} , die sich, bedingt durch die Versuchsanzahl im Grenzfall 1, zwangsläufig ergeben.

Grenzfall 1





Grenzfall 2

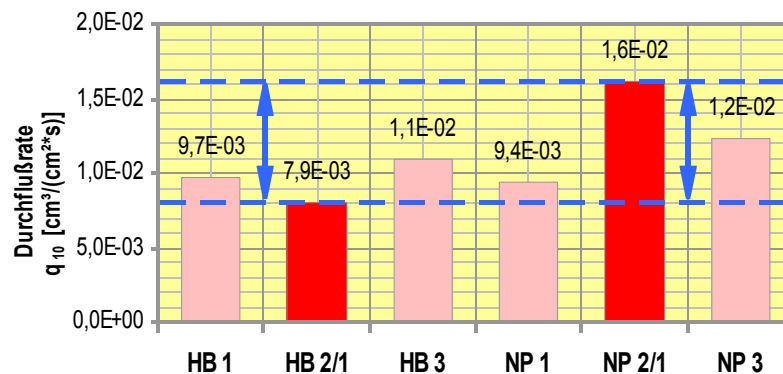
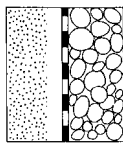


Abb. 5.10: Zusammenhang zwischen Benetzungswiderstand und Wasserdurchflußrate in den Grenzfällen 1 und 2

Im Hinblick auf das Benetzungs- und somit auch das Wasserdurchlässigkeitsverhalten der unterschiedlichen geosynthetischen Filterelemente ergibt sich bei Betrachtung der Extremwerte von q_{10} im Grenzfall 2 eine eindeutige Beziehung. Die größte -NP 2/1- und kleinste -HB 2/1-, aus den Ergebnissen der Großversuche ermittelte Wasserdurchflußrate q_{10} ist für solche geosynthetische Prüflinge zu verzeichnen, deren Benetzungsverhalten durch die Extremzustände der Kategorien A/2 -vollflächig saugend- und B/2 -vollflächig stauend- in Tab. 5.1 charakterisiert ist. Die Durchflußraten der Prüflinge HB 1, HB 3 und NP 3, die konsequenter Weise innerhalb des durch die Extremwerte gespannten Abschnittes liegen, sind, bezeichnet man sie an dieser Stelle als Zwischenwerte, Vliesstoffen zugehörig, deren Benetzungsverhalten mit den sogenannten Teilzuständen der Kategorien A/1 -teilflächig saugend- und B/1 -teilflächig stauend- nach zu kennzeichnen ist.

Mit obiger Argumentationskette könnte man somit zu dem Schluß kommen, daß von der Art und Intensität des Benetzungswiderstandes eines Vliesstoffes bzw. dessen Verhalten bei Wasserzutritt unmittelbare Aussagen über das Wasserableitvermögen und somit die Leistungsfähigkeit des geosynthetischen Filterelementes im Kontakt mit einem mineralischen Basiserdstoff möglich werden. Dies erweist sich bei Betrachtung der Durchflußrate von NP 1 und der Feststellung, daß dieser Vliesstoff der Kategorie A/2 -vollflächig saugend- nach Abb. 5.3 zuzuordnen ist, nur als teilweise haltbar. Trotz den, mit dem Größtwert von q_{10} bei NP 2/1, identischen Benetzungseigenschaften -Kategorie A/2-, erreicht NP 1 nur 59 % dessen Wasserableitekapazität. Hieraus folgernd resultiert die Feststellung, daß die

Einflüsse weiterer Mechanismen Ursache für diesen Sachverhalt sind. Verbindungen zwischen konventionellen Kenngrößen wie der wirksamen Öffnungsweite O_{90} oder dem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_v der Vliesstoffe und den in Abb. 5.10 dargestellten Zusammenhängen sind nicht erkennbar.

Das noch fehlende Glied der Argumentationskette ergibt sich bei Betrachtung der Detailaufnahmen zur Oberflächenstruktur der geosynthetischen Prüflinge in Abb. 5.11 und den in Abb. 5.12 enthaltenen Abhängigkeiten.

Abbildung 5.10 ausgelagert

Abb. 5.11: Detailaufnahmen zur Oberflächenstruktur der Prüflinge HB 1 - 3 und NP 1 - 3

Abbildung 5.11 ausgelagert

Abb. 5.12: Zusammenhang zwischen der Durchflußrate q_{10} des Grenzfalles 2 und der Oberflächenstruktur der geosynthetischen Filterelemente

Die Detailaufnahmen in Abb. 5.11 zeigen, daß die Oberflächenstrukturen der Vliesstoffe HB 1 bis 3 und NP 1 bis 3 durch ein voneinander abweichendes Erscheinungsbild gekennzeichnet sind. Dies hat sowohl für die Art der Wirrlage der Fasern, als auch für die hierdurch beeinflusste Rauigkeit der Vliesstoffoberfläche zu gelten.

So folgt die Wirrlage der Fasern bei HB 1 in Bild a) vornehmlich einer Richtung, die ebene, glatte Struktur tritt deutlich zu Tage. In merklich multidirektionaler Richtung verläuft die Wirrlage der größeren Anzahl von Fasern bei HB 2 ($m_{HB\ 2} > m_{HB\ 1}$ siehe Tab. 4.1). Die Struktur der Oberfläche ist, wie zuvor bei HB 1, unverkennbar eben und glatt. Innerhalb der Vliesstoffe der HB-Gruppe weist HB 3 in Bild c) die sichtbar größte Wirrlage der Fasern auf, die Struktur der Oberfläche ist HB 1 und HB 2 vergleichbar.

Offenkundige Hinweise auf einen bevorzugten Faserverlauf bei NP 1 können Bild d) in Abb. 5.11 nicht entnommen werden. Abweichend von der glatten und ebenen Oberflächenstruktur der Vliesstoffe der HB-Gruppe ist jedoch deutlich eine ungleich größere Rauigkeit der Oberfläche von NP 1 erkennbar, die sich in einer Wolkigkeit der dem Basiserdstoff zugehörigen Seite des Vliesstoffes äußert. Begründet in der Ausbildung der Wolkigkeit ist eine quasi-homogene Strukturierung der Vliesstoffoberfläche vorhanden. Die Strukturierung der Vliesstoffoberfläche mit dem Erscheinungsbild der Wolkigkeit ist für NP 2 in Bild e) nicht feststellbar. Es ist vielmehr eine raue Vliesstoffoberfläche mit deutlicher Wirrlage der Fasern zu erkennen. Darüber hinaus weisen dunklere Bereiche in Bild e) auf ein Oberflächenrelief des Vliesstoffes hin. Die Anordnung der Hoch- und Tiefpunkte des Reliefs führt zu einer offensichtlich inhomogeneren, rauhen Oberflächenstruktur des Vliesstoffes. Eine prägnante Ausbildung der vorgenannten reliefartigen Struktur von NP 2 weist Prüfling NP 3 in Bild f) auf. Die Rauigkeit der Oberfläche steigt im Vergleich zu NP 2 nochmals an, wofür häufig wechselnde, dunkle und helle Abschnitte der Aufnahme in Bild f) Beleg sind.

Führt man die Erkenntnisse obiger Analyse zusammen, können die Oberflächenstrukturen der Vliesstoffe HB 1 - 3 und NP 1 - 3 in Abb. 5.11 mit den Attributen „GLATT“, „WOLKIG“ und „RAUH“ gekennzeichnet werden. Setzt man diese in Beziehung zu den Durchflußraten q_{10} der Großversuche analog Grenzfall 2, ist die bereits mehrfach erwähnte Argumentationskette durch die in Abb. 5.12 enthaltenen Zusammenhänge weiter vervollständigt.

Die deutlich größte Durchflußrate q_{10} im Zustand II der Langzeitphase tritt für den oberflächig „rauen“ Vliesstoff NP 2/1 zu Tage. Der Minimalwert von q_{10} ist HB 2/1 mit „glatter“ Oberfläche zugehörig. Das Benetzungsverhalten beider Vliesstoffe ist durch die vorliegenden Untersuchungsergebnisse und der sich hieraus ergebenden Zuordnung zu den Kategorien A/2 -vollflächig saugend- von NP 2 und B/2 -vollflächig stauend- von HB 2 durch die Extremzustände des Auftretens der Phänomene „Vollsaugen“ bzw. „Aufstau“ gekennzeichnet.

Hieraus folgernd resultiert der Sachverhalt, daß offensichtlich jene Vliesstoffe ein besonders gutes Wasserableitvermögen aufweisen, deren Wasserdurchlässigkeitsverhalten sich durch das Auftreten des Prozesses „Vollsaugen“ bei Flüssigkeits- bzw. Wasserzutritt in Verbindung mit einer rauhen Oberflächenstruktur auszeichnet. Hingegen vermögen vollflächig stauende Vliesstoffe mit gleichzeitig glatter Oberfläche nur um etwa die Hälfte geringere Wassermengen abzuführen (Abb. 5.12). Für die Bedingungen des Grenzfalles 1 reduziert sich die Durchflußrate des Prüflings HB 2 weiter und erreicht nur noch 30 % des Absolutwertes von NP 2 (Abb. 5.10).

Das Wasserdurchlässigkeitsverhalten der Prüflinge HB 1, HB 3, NP 1 und NP 3 liegt innerhalb der Spannweite der Extremzustände des Benetzungsverhaltens und den Maximal- bzw. Minimalwerten von q_{10} . Es zeigt sich, daß eine Analyse des Wasserdurchlässigkeitsverhaltens der Vliesstoffe weder ausschließlich mit Erkenntnissen zum Benetzungswiderstand, noch zur Oberflächenrauigkeit widerspruchsfreie Ergebnisse liefert. Beweis hierfür

ist beispielsweise, daß die Durchflußrate von NP 3 trotz rauher Oberfläche des geosynthetischen Filterelementes nicht die Werte von NP 2/1 erreicht. Begründung: Bei Flüssigkeitszutritt erfolgt zunächst ein teilflächiger Aufstau des Fluids, ehe der Benetzungswiderstand durch einen Wasserabfluß unterhalb der überstauten Teilfläche überwunden wird. Wasserableitewirksam sind nur die mit der Flüssigkeit benetzten Flächenanteile.

Die ein vollflächiges Vollaugen begünstigenden Benetzungseigenschaften des Vliesstoffes NP 1 lassen zunächst auf ein im Bereich von NP 2/1 liegendes Wasserableitevermögen schließen. Begründet durch die geringere Rauigkeit von NP 1, repräsentiert durch das Attribut „wolkig“ der Oberflächenstruktur in (Abb. 5.12), werden jedoch nur um mehr als 40 % geringere Wassermengen im Vergleich zu NP 2/1 abgeführt. Die für HB 2 und NP 1 - 3 exemplarisch geführten Beweise zu Ursachen des unterschiedlichen Wasserdurchlässigkeitsverhaltens der Prüflinge, können für HB 1 und HB 3 analog vorgenommen werden.

Während die Erkenntnisse zum Benetzungsverhalten geosynthetischer Filterelemente zweifelsfrei den werkstoffbedingten Durchströmungswiderständen als Einzelanteil des Summenparameters der Durchströmungswiderstände zuzurechnen sind, gehen von der Beschaffenheit der Oberflächenstruktur des Vliesstoffes überdies Einflüsse auf das Stabilisierungsverhalten im Kontakt mit einem mineralischen Basiserdstoff aus. D. h.: Eine Aussage zur Oberflächenbeschaffenheit eines Vliesstoffes gibt gleichzeitig Auskunft über das diesem Vliesstoff charakteristische Stabilisierungsvermögen. Geosynthetische Vliesstoffe mit besonders rauher Oberfläche haben folglich ein weitaus besseres Stabilisierungsvermögen der Kornstruktur des Basiserdstoffes in der Kontaktzone als sonst vergleichbare „Glatte“.

Bezogen auf das Stabilisierungsvermögen von Verbundstoffkonstruktionen aus verschiedenen Kombinationen geosynthetischer Vliesstoffe mit und ohne Stabilisierungsschicht wird vorgenannte Problematik ausführlich in [0] mit grundsätzlich gleichen Ergebnissen behandelt. Weitere Angaben hierzu sind u. a. in [0], [0], [0] etc. enthalten. Hinsichtlich der in dieser Arbeit diskutierten Sachverhalte zur Kontaktsituation zwischen mineralischen Basiserdstoffen und geosynthetischen Filterelementen wird der Themenkreis der Oberflächenbeschaffenheit eines geotextilen Filters unter den Abschnitten 5.2 und 5.3 erneut aufgegriffen.

Übertragen in das Modell der Durchströmungswiderstände ergeben sich aus der Untersuchung werkstoffbedingter Durchströmungswiderstände und den dargelegten Zusammenhängen dieser Ergebnisse mit den Erkenntnissen des Einflusses der Kontaktsituation auf die Funktionsweise von Filterkonstruktionen mit Geotextilien weitere wichtige Kernaussagen:

- ⇒ Das unterschiedliche Benetzungsverhalten geosynthetischer Filterelemente als werkstoffspezifischem Durchströmungswiderstand kann durch die Prozesse „Aufstauen“ und „Vollaugen“ unabhängig von der Herstellungsart und anderen konventionellen Parametern, z. B. Öffnungsweite O_{90} oder Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_v , katalogisiert werden. Vorgenannte Prozesse können jeweils in Teilflächen oder auch vollflächig zu Tage treten (Abb. 5.3).
- ⇒ Die Beschaffenheit der Oberflächenstruktur des geosynthetischen Vliesstoffes nimmt, neben dem Auftreten werkstoffspezifischer Durchströmungswiderstände, eine zentrale Stellung im Hinblick auf die Wasserableitekapazität eines Filtersystems ein (Abb. 5.11 und Abb. 5.12).
- ⇒ Das Zusammenwirken von werkstoffbedingten Durchströmungswiderständen und dem Einfluß der Oberflächenrauigkeit kann als Ursache für das unter-

schiedliche Wasserdurchlässigkeitsverhalten der untersuchten Geotextilien in den Grenzfällen 1 bzw. 2 unter sonst gleichen Bedingungen gewertet werden.

- ⇒ Im Modell der Durchströmungswiderstände wirken sich die Einflüsse vorgenannter Vliesstoffeigenschaften durch Abweichungen in der Wasserableitkapazität q_{10} von 200 % gemäß den Randbedingungen im Grenzfall 1 und 100 % für die Kontaktsituation des Grenzfalles 2 aus. Der jeweils größere Absolutwert von q_{10} ist als entsprechend geringerer Durchströmungswiderstand im Modell der Durchströmungswiderstände präsent.
- ⇒ Geosynthetische Vliesstoffe mit einem, gegenüber anderen, deutlich besseren Wasserableitevermögen zeichnen sich durch das vollflächige Auftreten des Prozesses „Vollsaugen“ bei Flüssigkeitszutritt und gleichzeitig „rauher“ Struktur der Oberfläche in Kontakt zu einem mineralischen Basiserdstoff aus. Die Art des eingestellten Kontaktes -vollflächig im Zuge des Einbaues (GF 1) oder hydraulisch durch die Einwirkungen des Sickerwasserstromes (GF 2)- zwischen Basiserdstoff und geosynthetischem Filterelement hat hierauf scheinbar keinen grundsätzlichen Einfluß.

5.2 PROJEKTION AUF ANWENDUNGSFÄLLE IN-SITU

Die Projektion der Erkenntnisse auf Anwendungsfälle in-situ ist im Hinblick auf die Bewertung der praktischen Relevanz der Kontaktsituation auf die Funktionsweise entscheidendes Bindeglied. Mit Grundlage der unter Abschnitt 5.1 durchgeführten Ergebnisanalyse beeinflussen unterschiedliche Kontaktsituationen in der Grenzfläche zwischen einem mineralischen Basiserdstoff und einem geosynthetischen Filterelement im besonderen das Wasserdurchlässigkeitsverhalten (Abschnitt 5.1.1) dieser Filterkonstruktionen. Des weiteren gehen Auswirkungen auf die Art und Weise der Stabilisierung des Basiserdstoffes in der Kontaktzone aus (Abschnitt 5.1.2).

Entsprechen die Kontaktverhältnisse vor Ort der Bemessungsvorgabe des Intimate Contact (siehe u. a. Abb. 2.5 und Abschnitt 3.1), so setzt mit den Bedingungen des Grenzfalles 1 nach Abb. 4.2 während der Filtereinlaufzeit (Abb. 4.7) des Systems die für geosynthetische Filterelemente charakteristische Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit ein. Im Entwurfs- und Bemessungsstadium trägt man dieser Durchlässigkeitsabnahme beispielsweise durch die Abminderung des am fabrikneuen Geotextil bestimmten Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes Rechnung (Abschnitt 2.3.4, Abb. 2.15, Abb. 2.16). Die Ursachen der Durchlässigkeitsreduzierung liegen in der Veränderung der natürlichen Situation durch den Einbau der Filterkonstruktion und dauern solange an, bis sich ein in Abhängigkeit zu den spezifischen örtlichen Verhältnissen neuer Gleichgewichtszustand innerhalb des Systems mineralischer Basiserdstoff + geosynthetischer Filter + Sickerwasser eingestellt hat. Mögliche einwirkende und widerstehende Größen, die den Verlauf der Filtereinlaufzeit beeinflussen können, sind in Abb. 2.7 gegenübergestellt.

Wie in Kapitel 2 und 3 dieser Arbeit aus mehreren Blickwinkeln betrachtet, ergeben sich infolge grundsätzlicher struktureller Unterschiede zwischen mineralischen Kornfiltern und geosynthetischen Filterelementen jedoch Systembedingungen, die eine Umsetzung der Bemessungsvorgabe Intimate Contact nur in begrenztem Umfang gestatten -s. a. Analyse der Kontaktbedingungen der maßgebenden hydraulischen Filterbeanspruchungsfälle nach Abb. 2.5 in Abschnitt 2.3.3 und Feststellung sogenannter „unvermeidbarer Unebenheiten des Planums“ in MAG (1993a)-. Als Extremzustand dieser Systemverhältnisse haben die Kontaktbedingungen des Grenzfalles 2 nach Abb. 4.2 zu gelten. Diese bilden auch aus Sicht

der Auflastverhältnisse, der Anströmrichtung des Geotextils und dem Zusammenwirken von Gravitation und hydraulischer Belastung sehr ungünstige Verhältnisse ab.

Während der Filtereinlaufzeit stellt sich für die Kontaktbedingungen des Grenzfalles 2 -Hohlraum in der Grenzfläche-, verglichen mit Grenzfall 1 -vollflächiger Kontakt-, eine weitere, zusätzliche Reduzierung der Durchlässigkeit des Geotextils ein (s. a. Abschnitte 3.2 und 5.1). Diese zusätzliche Reduzierung ist nach vorliegendem Kenntnisstand eine in bislang in der Praxis gebräuchlichen Bemessungsansätzen nicht berücksichtigte Verhaltensweise.

Mit der Durchlässigkeitsabnahme eines bodenmechanischen Filters während der funktionellen Gebrauchsphase (Abb. 2.9) wird gemeinhin der Begriff der Kolmation (Abschnitt 2.3.1) verbunden. Die Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit beim Einsatz geosynthetischer Filterelemente als Folge von Kolmationserscheinungen ist gekennzeichnet durch das Auftreten der Prozesse Blocking, Clogging (Abb. 2.11) und der Teilchenanlagerung an den Oberflächen der Fasern des Geotextils. Es sei an dieser Stelle erwähnt, daß die in der Fachwelt gängige Sprachregelung genannter Prozesse nicht einheitlich ist und zu Charakteristik und Definitionen voneinander abweichende Auffassungen bestehen. Weitere, über die in dieser Arbeit enthaltenen hinausgehende Angaben zur Kolmationsproblematik können beispielsweise [0], [0], [0], [0] u. a. entnommen werden.

Die Charakteristik einer Durchlässigkeitsminderung bei Kolmationsvorgängen aufgreifend, kann die Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit eines geosynthetischen Filterelementes bei Kontaktbedingungen analog Grenzfall 2 zwar mit diesem Erscheinungsbild verglichen, aber nicht gleichgesetzt werden, weil ursächlich verschiedene Randbedingungen und Einflüsse für dieses Erscheinungsbild verantwortlich sind. Dennoch zulässig ist es, die Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit eines Filtersystems, respektive des geotextilen Filterelementes, als Folge von Abweichungen vom Ideal-Zustand des Intimate Contact mit dem Begriff Kolmation zu beschreiben. Den einhergehenden, im Vergleich zur „Echten“ Kolmation, verschiedenartigen Mechanismen und Prozessen wird durch die Präzisierung „Scheinbare Kolmation“ Rechnung getragen (Batereau/Baumbusch (1996)). Im Gegensatz zum Erscheinungsbild der „Echten“ Kolmation, die mit einem unzulässigen Korntransport eines suffosionsgefährdeten, nichtbindigen mineralischen Basiserdstoffes einhergeht, ist die zusätzliche Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit als Folge nicht idealer Kontaktverhältnisse analog Grenzfall 1 Kennzeichen der „Scheinbaren Kolmation“.

Liegen die Kontaktbedingungen des Intimate Contact (Grenzfall1) vor und können Bemessungs- und/oder Konstruktionsfehler ausgeschlossen werden, ist von der Ausbildung eines stabilen Geotextil-Boden-Filtersystems auszugehen, d. h., die Scheinbare Kolmation ist nicht zu beobachten und die zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit zwingend erforderliche Stabilisierung der Kontaktfläche wird durch die Verhinderung von Kornumlagerungs- und -transportprozessen unmittelbar mit dem Anlaufen des Systems zu Beginn der Filtereinlaufzeit eingeleitet (s. a. Abschnitt 4.4).

Für Kontaktbedingungen analog Grenzfall 2 wird die Stabilisierung der Grenzfläche des Basiserdstoffes durch Verfüllvorgänge der Hohlräume bei Sickerwasserzustrom und/oder einer Änderung der Spannungsverhältnisse behindert. Diese Verfüllvorgänge sind gekennzeichnet durch Umlagerungsprozesse der Kornstruktur des Basiserdstoffes, deren Erscheinungsbild u. a. die Mobilität einzelner, mehrerer oder aller Kornfraktionen des Basisbodens ist. In Abhängigkeit zur Oberflächenstruktur des geosynthetischen Filters in der Kontaktebene laufen die Verfüllprozesse der Hohlräume entweder quasi-ungehindert ab -glatte Oberfläche des Geotextils-, oder die Oberflächenstruktur des Vliesstoffes setzt den Umlagerungsprozessen durch die Reduzierung der möglichen Kornmobilität einen Wider-

stand entgegen -raue Oberfläche des Vliesstoffes-. Es entwickelt sich die unter Abschnitt 3.2.2 beschriebene, „besonders ausgeprägte Kontaktsituation“, z. B. durch die Ausbildung von Zonen bevorzugter Wasserwegigkeiten (s. a. Abschnitte 4.2.2.2 und 4.2.3.2).

Zur Vermeidung mißverständlicher Interpretationen im Zusammenhang mit der Verwendung des Begriffes „Kornmobilität“, z. B. mit der Definition von Böden mit hoher Einzelkornmobilität in [0] oder [0], die hier ausschließlich in der Verfüllung vorliegender Hohlräume in der Grenzfläche zwischen Basiserdstoff und geosynthetischem Filterelement begründet ist, wird der Terminus Kontaktmobilität eingeführt. Dieser faßt alle Bewegungen innerhalb des Korngefüges eines Basiserdstoffes in der Kontaktzone zusammen, die ursächlich auf die Einstellung des Intimate Contact in der Grenzfläche Basiserdstoff/geosynthetisches Filterelement zurückzuführen sind. Hiervon betroffen können sowohl einzelne, mehrere, alle Fraktionen und/oder Einzelkörner des Basiserdstoffes sein. Je nach Größe des der Kontaktmobilität entgegengesetzten Widerstandes in der Kontaktzone stellt sich die Verfüllung der Hohlräume in der Grenzfläche für oberflächlich „glatte“ Vliesstoffe vergleichsweise schneller als für „Rauhe“ ein.

Hierdurch werden beispielsweise die zeitlichen Unterschiede im Erreichen des Zeitpunktes t_3 (Abb. 4.7) als Beginn der Langzeitphase und Ausdruck der Dauer der Filtereinlaufzeit der Großversuche in der „Weimarer Zelle“ erklärbar. Von Art und Ausbildung der Kontaktmobilität bei Verwendung unterschiedlicher Geotextilien unter sonst gleichen Bedingungen scheinen mit Hinweis auf Abb. 4.13 und Abb. 4.18 auch Einflüsse auf das Bodeneinlagerungsverhalten auszugehen. Vor dem Hintergrund der Tatsache, daß die Simulation hydraulischer Beanspruchungsgrößen unter Laborbedingungen zur Untersuchung des Bodeneinlagerungsverhaltens nicht unproblematisch ist, sind zur Absicherung der in Abb. 4.13 und Abb. 4.18 enthaltenen Ergebnisse weiterführende Untersuchungen erforderlich. Dennoch fällt auf, daß sich der Einfluß unterschiedlicher Kontaktsituationen bei glatten Vliesstoffen HB 2/1 scheinbar ausgeprägter im Grad der Bodeneinlagerung auswirkt als bei „Rauhen“ -NP 2/1-. Ein möglicher Erklärungsansatz könnte hier die Art des Abbaus der durch die Kontaktmobilität auf die Einzelkörner eingeleiteten Bewegungsenergie sein. Während diese bei glatter Vliesstoffoberfläche einem Auf- und Rückprall vergleichbar abläuft, überwiegt bei rauher Oberfläche der Vorgang des „Festhaltens“ der Bodenkörner. Diese Betrachtungsweise bedarf jedoch der Diskussion von Absolutwerten eingelagerter Bodenpartikel und nicht des Grades der Bodeneinlagerung im Bezug zum Flächengewicht des Geotextils.

Eine weitere Kernaussage des Einflusses unterschiedlicher Kontaktsituationen auf das Wasserdurchlässigkeitsverhalten und Ursache des differenten Verhaltens unterschiedlicher Geotextilien unter sonst gleichen Bedingungen ist die mit der Behinderung der Kontaktmobilität -Behinderung im positiven Sinne- verbundene Intensität der Ausbildung einer Faser-Boden-Verbundzone vor der Kontaktebene. Diese kann sich bei oberflächlich strukturierten, „rauen“ Vliesstoffen offensichtlich besser entwickeln. Unter dem Begriff der Faser-Boden-Verbundzone ist jener Abschnitt vor der Kontaktebene zu verstehen, in der sich durch das Zusammenwirken von Bodenpartikeln und Fasern eine „Verankerung“ der Struktur des geotextilen Filters mit dem Korngefüge des Basiserdstoffes einstellt. Mit der Präsenz einer Faser-Boden-Verbundzone kann darüber hinaus auch eine Abstufung beim Übergang von maßgebenden Porengrößen des Basiserdstoffes zu der als wirksam definierten Öffnungsweite des Geotextils erzielt werden, was aus filtertechnischer Sicht positiv zu bewerten ist (s. a. [0], [0]).

Im Wasserdurchlässigkeitsverhalten äußert sich die unterschiedlich ausgeprägte Ausbildung vorgenannten Phänomens beispielsweise durch in der Kontaktzone um den Faktor 2,1 von-

einander abweichende mittlere hydraulische Gradienten „ i_m “ der Systeme HB 2/1 - $i_{mEv} = 1,51$ - und NP 2/1 - $i_{mEv} = 3,20$ - des Grenzfalles 2 (s. a. Abb. 5.6). D. h.: Die Behinderung -Behinderung im positiven Sinne- der Kontaktmobilität als Folge der Ausbildung einer Faser-Boden-Verbundzone ist besonders in der Kontaktzone durch höhere hydraulische Gradienten gekennzeichnet und führt im Zusammenwirken mit den Einflüssen werkstoffspezifischer Durchströmungswiderstände zu einer größeren hydraulischen Leistungsfähigkeit des Filtersystems.

Kann die Stabilisierung der Grenzfläche durch eine zum Stillstand kommende Kontaktmobilität nicht erzielt werden, sind Auswirkungen, wie in den von Koerner/Koerner [0], Heerten [0] und Giroud [0] vorgestellten Schadensfällen, bei Abweichungen vom Ideal-Zustand des Intimate Contact zu befürchten. Diese sind als „Worst Case“ (schlimmster Fall) zu bezeichnen. Streng genommen wird Zustand II -Langzeitphase innerhalb der funktionellen Gebrauchsphase nach Abb. 4.7- bei diesen Systemen nie erreicht, weil die ständige Veränderung der Gleichgewichtszustände erst durch das Eintreten eines Versagenszustandes beendet wird und dann „quasi-stationäre“ Bedingungen vorherrschen und/oder sich quasi-stationäre Bedingungen einstellen können. Auch das Erreichen eines quasi-stationären Gleichgewichtszustandes über mehrere Versagensstadien ist möglich (Abb. 2.19 Bilder c), d) und e), f)).

Allen vorgenannten Schadensfällen gemein ist, daß die Größe dortiger hydraulischer Beanspruchungen die Werte des hydraulischen Gradienten „ i “ der Großversuche in der „Weimarer Zelle“ übersteigen. Koerner/Koerner [0] führen die ihrer Auffassung nach vorgelegenen großen Gradienten auf dynamische Einwirkungen des Straßenverkehrs auf die PGED-Elemente der Straßenlängsentwässerung zurück. Bekanntermaßen extreme Bedingungen bilden die auf Deckwerkskonstruktionen im Wasserbau einwirkenden hydraulischen Gradienten für Filter- und Erosionsschutzkonstruktionen ab -Schadensfälle von Heerten [0] und Giroud [0]-. Der im Zusammenhang mit Deckwerkskonstruktionen erforderliche schnelle Abbau großer hydraulischer Gradienten bei z. B. Wasserspiegeländerungen aus Wellenschlag, impliziert die Gewährleistung einer großen hydraulischen Leistungsfähigkeit des Filtersystems und weist somit auf die praktische Bedeutung der Unterschiede des Gradienten „ i_m “ der Systeme HB 2/1 und NP 2/1 in Abb. 5.6 hin.

Mit der Erhöhung der hydraulischen Belastung einher gehen steigende Anforderungen an das Bodenrückhaltevermögen des geosynthetischen Filterelementes, das im Zusammenwirken mit großen hydraulischen Gradienten + unzureichenden Kontaktverhältnissen Ursache des unzulässigen Korntransportes in den Drainkörper der PGED-Elemente in [0] ist.

Die Wirkungsweise der in [0] vorgeschlagenen Veränderungen im Konstruktionsprinzip der PGED-Entwässerungssysteme (Abb. 2.18 Bild b) -Verwendung eines Verfüllbodens mit Begrenzung des Anteiles abschlämmbarer Kornfraktionen und Einstellen der kombinierten Filter-Drainage-Verbundkonstruktion an der Böschungsseite des Grabens- wird aus den Ergebnissen der Ausgrabung geosynthetischer Filtermaterialien in Tiefenentwässerungen des Bahnkörpers an Entnahmestelle 1 ersichtlich (Abschnitt 4.4). Durch den Einbau einer aus gleichförmigem Sand bestehenden Grabenverfüllung konnten die Bedingungen des Intimate Contact sichergestellt und die Funktionstüchtigkeit des Systems durch eine über Jahrzehnte stabile Grenzfläche Basiserdstoff / geosynthetisches Filter- bzw. Drainelement gewährleistet werden.

Nicht unmittelbar im Zusammenhang der Problematik des Intimate Contact stehend ist der Abbau des polymeren Grundwerkstoffes am Sickerwandmaterial Wufilon P 30 als Bestätigung der von Batereau (1981) (Abschnitt 2.3.3 -Langzeitphase-) vertretenen Auffassung zu Fragen der Beständigkeit zu bewerten.

Die nach heutigen Maßstäben eher geringe Öffnungsweite der vertikal angeordneten Sickerwand Wufilon P 30 -Entnahmestelle 1 Bahnlinie Berlin Dresden, Abschnitt Walddrehna-Uckro- weist mit dem vorhandenen Bodeneinlagerungsgrad (Grad der Einlagerung $m_{\text{Ein}} = 52 \%$ entspr. 777 g/m^2) von mehr als der Hälfte des noch vorhandenen Flächengewichtes auf die Bedeutung des Bodenrückhaltevermögens hin (Tab. 4.7). Sie ist darüber hinaus Beleg für die Erfordernis weiterführender Untersuchungen zur Bewertung diesbezüglich in den Großversuchen festgestellter Verhaltensweisen.

Bezogen auf die geforderte, ausreichende hydraulische Leistungsfähigkeit von Filtersystemen, gibt die im Vergleich zum fabrikneuen Produkt eingetretene Abminderung der Wasserdurchlässigkeit des mechanisch verfestigten Vliesstoffes um nahezu 2 Zehnerpotenzen weitere wichtige Hinweise zur Größe der hydraulischen Beanspruchung von Filtersystemen mit einer Lage der Grenzfläche analog Lastfall III nach Abb. 2.5.

Die im Rahmen des Untersuchungsprogrammes der Ausgrabungen ermittelten Lagerungsdichten des Basiserdstoffes in der Kontaktzone liegen unterhalb der einfachen Proctordichte und stimmen bemerkenswert gut mit den Versuchswerten des vergleichbaren Testsandes der Systeme HB 2/2 und NP 2/2 in Abb. 4.20 überein. Das für die Durchführung der Großversuche in der „Weimarer Zelle“ entwickelte Untersuchungsprinzip und die Art der Versuchsdurchführung sind somit auf Verhältnisse in-situ übertragbar.

Hieraus ergibt sich im Vergleich der Lagerungsdichten der Großversuche analog Grenzfall 1 bzw. 2, daß die hydraulisch induzierte Verfüllung von Hohlräumen in der Grenzfläche im Grenzfall 2 mit einer über den Einbauzustand hinausreichenden Verdichtung des Basiserdstoffes in der Kontaktzone einhergeht, während sich für die Bedingungen des Intimate Contact -Grenzfall 1- eine Entspannung des Korngefüges einstellt. -Vergleich der Werte

ρ_d Einbau und ρ_d Ausbau, Unten in Abb. 4.12 und Abb. 4.20-.

Diese Verhaltensweise kann mit Basis der an Entnahmestelle 2 festgestellten Verhältnisse offensichtlich nicht unmittelbar auf Basiserdstoffe mit plastischen Eigenschaften übertragen werden. Es zeigt sich jedoch, daß mit den vorhandenen Verfestigungen geringer Durchlässigkeit an der Oberfläche des Grabenfilters Kridee 100 Kontaktphänomene auch für solche Erdstoffe stattfinden können. Von besonderer Bedeutung scheint hier der Bereich der Wasserwechselzone zu sein. Inwieweit diese Verfestigungen, „Tonsteinnägel“, auf die Problematik des Intimate Contact zurückzuführen sind, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten.

Aus der Projektion der vorgelegten Erkenntnisse auf praktische Anwendungsfälle können folgende zentrale Aussagen in die Formulierung von Empfehlungen für Entwurf und Bemessung von Filtersystemen mit Geotextilien einfließen:

- ⇒ Über die für geosynthetische Filterelemente charakteristische Abnahme der Wasserdurchlässigkeit im Kontakt mit einem mineralischen Basiserdstoff hinaus, wird die Durchlässigkeit eines geotextilen Filters bei Abweichungen vom Idealzustand des Intimate Contact zusätzlich reduziert. Diese zusätzliche Reduzierung ist eine bislang in Bemessungsansätzen der Praxis nicht berücksichtigte Verhaltensweise und kann mit dem Begriff der Scheinbaren Kolmation charakterisiert werden.
- ⇒ Die Abweichungen von der Bemessungsvorgabe des Intimate Contact ergeben sich für viele Anwendungsfälle nahezu zwangsläufig und führen während der Einlaufzeit eines Filtersystems zum Auftreten des Prozesses der Kontaktmobilität. Dieser Prozeß verbindet alle mit der Einstellung des Intimate Contact einhergehenden Umlagerungs- und Bewegungsvorgänge eines Korngefüges in der Kontaktzone.

- ⇒ Intensität, Ausbildung und Dauer der Kontaktmobilität werden entscheidend von der Präsenz werkstoffspezifischer Durchströmungswiderstände in der Kontaktzone beeinflusst. Hierbei steht eine durch werkstoffspezifische Durchströmungswiderstände -Oberflächenrauigkeit- im positiven Sinne behinderte und deshalb vergleichsweise länger anhaltende Kontaktmobilität für eine, gegenüber den hydraulischen Einwirkungen des Sickerwassers, stabilere Grenzfläche in der Kontaktzone.
- ⇒ Die Größe des durch die Oberflächenrauigkeit eines geosynthetischen Filterelementes der Kontaktmobilität entgegenstehenden Widerstandes wirkt sich in der unterschiedlichen Ausbildung einer Faser-Boden-Verbundzone vor der Kontaktebene aus. So bewirkt eine große Oberflächenrauigkeit eine deutlich ausgeprägtere Faser-Boden-Verbundzone, die durch die erzielte Porenabstufung in Fließrichtung eine wiederum größere hydraulische Leistungsfähigkeit des Filtersystems zur Folge hat.
- ⇒ Kann die Grenzfläche des Basiserdstoffes durch eine zum Stillstand kommende Kontaktmobilität nicht stabilisiert werden, ist dies im Extremfall mit für Bauwerke schwerwiegenden Konsequenzen verbunden; z. B. Verlust des Bodenrückhaltevermögens des geotextilen Filters [0] oder Verlust der hydraulischen Filterwirksamkeit [0], [0].
- ⇒ Die Ergebnisse durchgeführter Ausgrabungen geosynthetischer Filterelemente lassen die Feststellung zu, daß:
 - ⇒ mit der Gewährleistung der Bemessungsvorgabe des Intimate Contact für, aus filtertechnischer Sicht, ungünstige Verhältnisse -Lastfall III nach Abb. 2.5 -über Jahrzehnte funktionsfähige Entwässerungssysteme hergestellt werden können.
 - ⇒ das mit den Großversuchen in der „Weimarer Zelle“ entwickelte und angewandte Untersuchungsprinzip, sowie die Ergebnisanalyse über die Betrachtung des aus Einzelanteilen bestehenden Summenparameters der Durchströmungswiderstände, die Randbedingungen praktischer Anwendungsfälle gut abbildet, eine Überführung der Erkenntnisse in Empfehlungen für Konstruktion und Bemessung deshalb zulässig ist. Hieraus resultiert, daß eine im Hinblick auf Verhältnisse in-situ deutlich verbesserte Simulation durch die Untersuchungen erzielt werden konnte.

5.3 EMPFEHLUNGEN FÜR ENTWURF UND BEMESSUNG

Vom Beginn der Entwurfsphase bis hin zur praktischen Herstellung steht die einem Filtersystem zugewiesene Aufgabe bzw. deren Umsetzung innerhalb der Konstruktion im Vordergrund aller Arbeitsetappen. D. h.: Die durch die Aufgabe vorgegebenen Leistungsdaten und Eigenschaften der Konstruktion müssen über die Formulierung und Gewährleistung von Anforderungen und Kriterien modelliert werden. Dies geschieht in aller Regel mit der Betrachtung von Mechanismen und Prozessen, die die Einschränkung einer oder mehrerer der Konstruktion zugewiesenen Eigenschaften herbeiführen können.

Mit Grundlage der zur Thematik des Intimate Contact vorgelegten Untersuchungsergebnisse zeigt sich, daß für den Einsatz geosynthetischer Filterelemente über die Gewährleistung der

mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit während der funktionellen Gebrauchsphase hinaus das Stabilisierungsvermögen / -verhalten dieser geosynthetischen Baustoffe von entscheidender Bedeutung für das Systemverhalten und die Funktionsfähigkeit sind. Weniger vom Standpunkt der eigentlichen Aufgabe des Filters, als vielmehr bedingt durch strukturelle Unterschiede des Baustoffes „Geotextil“ im Vergleich zur Struktur mineralischer Basiserdstoffe sind Art und Weise der Stabilisierung der Kontaktzone, neben den durch die filtertechnische Bemessung quantifizierten Randbedingungen, maßgebende Bewertungsgrundlage der Funktions- und Leistungsfähigkeit. Die zentralen filtertechnischen Anforderungen, die vom eingesetzten Material -mineralischer Mischfilter oder Geotextilfilter- unabhängig gewährleistet werden müssen, sind beim Einsatz geosynthetischer Filterelemente somit zu ergänzen (Abb. 5.13). Mit dem in Abb. 5.13 enthaltenen Oberbegriff der Kontaktstabilität, der Prozesse und Phänomene, die im Hinblick auf Art und Weise der Stabilisierung der Kontaktzone bedeutsam sind, zusammenfaßt, wird diese Ergänzung vorgenommen.

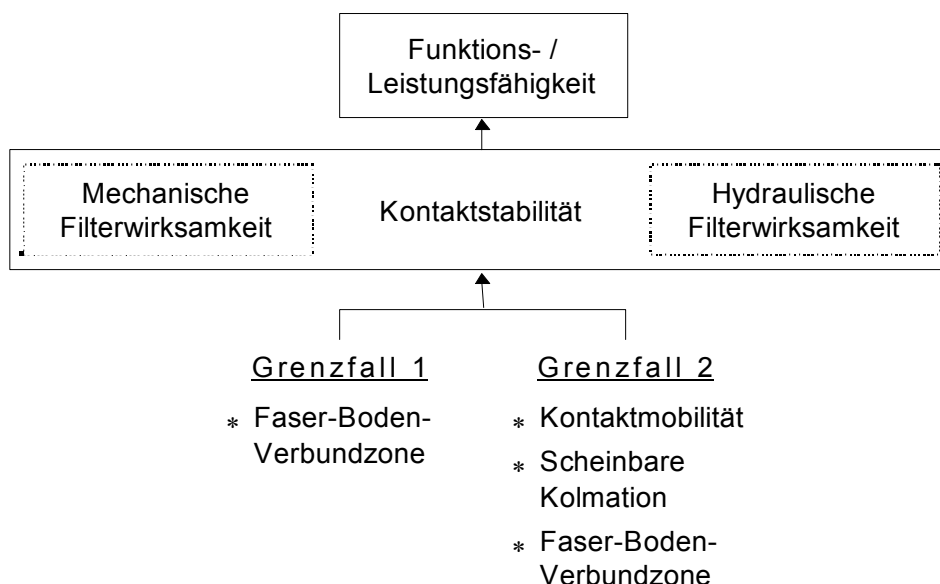


Abb. 5.13: Maßgebende Rahmenbedingungen der Funktions- und Leistungsfähigkeit von Filtersystemen mit Geotextilien

Erlauben die Bedingungen in-situ eine Umsetzung der Bemessungsvorgabe Intimate Contact (Grenzfall 1 nach Abb. 4.2), beschränken sich die Auswirkungen der Kontaktstabilität auf Prozesse und Mechanismen, die im Zusammenhang mit der Ausbildung der Faser-Boden-Verbundzone (Definition siehe Abschnitt 5.2) stehen -siehe unterschiedliches Wasserdurchlässigkeitsverhalten der Systeme HB 2/2 und NP 2/2 unter sonst gleichen Bedingungen-. Ist die Kontaktsituation in der Grenzfläche durch Abweichungen vom Ideal-Zustand des Intimate Contact gekennzeichnet (Grenzfall 2), sind zusätzlich Einflüsse der Kontaktmobilität und der Scheinbaren Kolmation zu berücksichtigen (siehe Ergebnisanalyse Abschnitte 5.1 und 5.2).

Mit Blick auf die Problematik der prinzipiellen Umsetzung des vollflächigen Kontaktes in der Grenzfläche zwischen Basiserdstoff und geotextilem Filter unter in-situ Bedingungen ergibt

sich die Notwendigkeit zur Präzisierung der in Abb. 2.7 enthaltenen Gegenüberstellung von Einwirkungen und Widerständen in Filtersystemen gemäß Abb. 5.9.

Während der Filtereinlaufzeit ist der temporär wirksame Prozeß der Kontaktmobilität als zusätzlich einwirkende Größe „S“ zu behandeln. Nach erfolgter Stabilisierung der Kontaktzone mit dem Abschluß der Filtereinlaufzeit, sind während der Langzeitphase die Auswirkungen der Scheinbaren Kolmation auf das Systemverhalten zu berücksichtigen. Diese bestehen nach den hier vorliegenden Erkenntnissen für laminare Strömungsverhältnisse vornehmlich in einer Abnahme der hydraulischen Leistungsfähigkeit des Filtersystems (siehe Gegenüberstellung der Wasserdurchflußraten q_{10} in Abb. 5.8). Einschränkungen der mechanischen Filterwirksamkeit bestehen nach den hier vorgelegten Ergebnissen nicht.

Mit den in Abb. 5.13 und Abb. 5.9 dargestellten Sachverhalten und Zusammenhängen können die funktionellen Anforderungen an geosynthetische Filterelemente (siehe auch Abschnitt 2.3.2) durch die Formulierung eines Kontaktkriteriums weiter vervollständigt werden:

Kontaktkriterium

Die Kontaktverhältnisse in-situ sind im Hinblick auf die erforderliche Leistungsfähigkeit des Filtersystems zu bewerten.

Die Vorbereitung der Auflagerfläche des Geotextils ist hierbei so vorzunehmen, daß eine durch die Kontaktverhältnisse bedingte Einschränkung der mechanischen und/oder hydraulischen Filterwirksamkeit ausgeschlossen werden kann. Gleiches gilt für die durch Überschütten und/oder Überbauen aufgebrachte Filterauflast.

Gestatten die Verhältnisse vor Ort keine adäquate Vorbereitung der Auflagerfläche, ist den Auswirkungen der Kontaktmobilität durch Auswahl eines oberflächig rauhen Geotextils Rechnung zu tragen.

Bereiche in denen durch Kontaktverhältnisse in-situ oder andere Einflüsse bedingte Abweichungen von der Bemessungsvorgabe des Intimate Contact vorliegen, verhindern die Erfüllung der dem Filter zugewiesenen Aufgabe. Diese Feststellung resultiert aus der bei Sickerwasserzustrom und/oder einer Änderung der Spannungsverhältnisse einsetzenden Hohlraumverfüllung, die einer Umlagerung der Kornstruktur des Basiserdstoffes in der Grenzfläche entspricht und unter bestimmten Bedingungen das Versagen des Filtersystems nach sich ziehen kann (s. a. Abschnitte 2.4 und 3.1).

Nachdem diese Umlagerungsvorgänge jedoch nicht im Ansatz der in der Praxis gebräuchlichen Bemessungsregeln als vielmehr in der unzulänglichen Übertragung der Bemessungsrandbedingungen auf praktische Verhältnisse begründet sind, stehen im Hinblick auf die Minimierung der Auswirkungen der Phänomene Kontaktmobilität und Scheinbare Kolmation zwei Ansatzpunkte zur Verfügung:

- Berücksichtigung des Auftretens von Hohlräumen z. B. infolge sogenannter „unvermeidbarer Unebenheiten des Planums“ (in [0]), durch die Formulierung von der realen Kontaktsituation entsprechenden Randbedingungen vor der Filterbemessung,
- Gewährleistung der Bemessungsvorgabe Intimate Contact durch eine bis auf unvermeidbare Unebenheiten vorbereitete ebene und hohlraumfreie Auflagerfläche in Verbindung mit besonderen konstruktiven Maßnahmen

Besondere konstruktive Maßnahmen können beispielsweise sein:

- ⇒ Einbau eines nichtbindigen Verfüll- und/oder Ausgleichmaterials, dessen Kornverteilung eine Verfüllung vorhandener Hohlräume in der Grenzfläche zwischen Basiserdstoff und geotextilem Filter garantiert (s. a. Abb. 2.1 Bild c), [0], [0])
- ⇒ Verwendung geotextiler Filterelemente, deren Struktur durch eine unter Auflast lokal veränderliche Kompressibilität in der Lage ist, unvermeidbare Unebenheiten des Planums auszugleichen (s. a. [0], [0])

Vorgenannte besondere konstruktive Maßnahmen bleiben, vornehmlich bedingt durch den entstehenden ökonomischen Aufwand, nicht nur aus filtertechnischer Sicht anspruchsvollen Bauwerken (z. B. Deckwerkskonstruktionen oder andere Anwendungsfälle, die eine Kombination der Funktionen Filtern und Schützen i. S. v. Erosionsschutz erfordern) oder Anwendungsfeldern vorbehalten, die eine Realisierung durch den Einsatz maschineller Technik gestatten (z. B. [0]).

Für die weitaus größere Anzahl von Filteranwendungen der Baupraxis jedoch haben besondere konstruktive Maßnahmen als nicht vertret- und durchführbar zu gelten. Dies bedeutet, daß die der Filterbemessung zugrunde gelegten Randbedingungen im Zusammenhang mit der Problematik einer Umsetzung des vollflächigen Kontaktes unter in-situ Bedingungen zu modifizieren sind.

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen, daß Abweichungen vom Ideal-Zustand des vollflächigen Kontaktes für laminare Bedingungen vornehmlich mit einer Reduzierung der hydraulischen Leistungsfähigkeit einhergehen. Einschränkungen des Bodentrückhaltevermögens wie beispielsweise in [0], oder Entmischungsvorgänge im Sinne der Ausbildung einer undurchlässigen Schicht vor dem geosynthetischen Filterelement wie in Heerten [0] und Giroud [0], konnten nicht festgestellt werden.

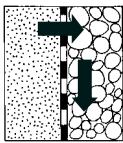
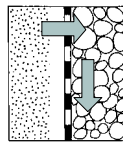
Eine Kenngröße zur Quantifizierung der hydraulischen Leistungsfähigkeit eines Filtersystems ist die der Bewertung des Systemverhaltens der Großversuche in der „Weimarer Zelle“ zugrunde gelegte Wasserdurchflußrate q . Im Vergleich zur derzeit noch gebräuchlicheren Größe des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes k_f bietet die Durchflußrate q im Hinblick auf die Aussagefähigkeit entscheidende Vorteile:

- ⇒ Die Ermittlung der Durchflußrate q bedingt nicht zwingend die Bestimmung/Kennntnis des Absolutwertes des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes k_f . Dieser ist, begründet durch sehr vielfältige Möglichkeiten der Bestimmung, oftmals nicht unmittelbar mit anderen Werten vergleichbar und bildet, übertragen auf Verhältnisse in-situ, nur äußerst idealisierte Bedingungen (z. B. Durchströmungsrichtung vertikal/horizontal) ab.
- ⇒ Durch die Versuchsbedingung „freie Ausbildung der Sickerlinie“ kann die für die Funktions- und Leistungsfähigkeit des Systems praktisch weitaus relevantere Angabe real anfallender bzw. abführbarer Durchflußmengen erfolgen. D. h. auch: Die Angabe einer Durchflußrate q , die auf Grundlage eines vorgegebenen, konstanten Durchflußquerschnittes ermittelt wurde, ist ohne Vergleichsuntersuchungen nicht auf die Werte von q_{10} der Großversuche in der „Weimarer Zelle“ übertragbar.
- ⇒ Das Wasserdurchlässigkeitsverhalten geosynthetischer Filterelemente, das im Vergleich zu mineralischen Basiserdstoffen eher mit der Bezeichnung Wasserdurchtrittsverhalten zu beschreiben ist, kann, besonders auch im Hinblick auf die hydraulische Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Geotextilien, merklich präziser charakterisiert und quantifiziert werden (siehe besonders Abschnitt 5.1.2 und Abb. 5.3)

Mit der Feststellung, daß die in der Kontaktzone/Grenzfläche ausgelösten Umlagerungsvorgänge des Basiserdstoffes nicht ursächlich auf die in der Praxis angewandten Bemessungsregeln zurückzuführen sind, wird empfohlen, den Auswirkungen der Kontaktverhältnisse in-situ auf das Wasserdurchlässigkeitsverhalten durch Einführung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_q Rechnung zu tragen. Der Index q des Teilsicherheitsbeiwertes rührt von der hydraulischen Kenngröße Durchflußrate „q“ her und enthält gleichzeitig den Hinweis, daß im Vergleich zum Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k aus praktischer Sicht die Größe der von einem Filtersystem abführbaren absoluten Wassermenge ungleich bedeutender ist (s. a. [0]).

Durch Anwendung des semi-probabilistischen Sicherheitskonzeptes -s. a. DIN V ENV 1997-1 (04/96)- werden sowohl die Berücksichtigung unterschiedlicher Kontaktsituationen als auch die differenzierte Betrachtung der Wasserableitfähigkeit unterschiedlicher Geotextilien ermöglicht.

Die Einführung von in Abhängigkeit zur Kontaktsituation und strukturbedingten Eigenschaften unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerten γ_q wie in Tab. 5.2 vorgeschlagen, gestattet eine dem in-situ Verhalten der geotextilen Filterelemente vergleichbare Quantifizierung der hydraulischen Leistungsfähigkeit.

Oberflächenstruktur des Geotextils	Grenzfall 1	Grenzfall 2
		
„Glatt“ γ_q	3,0	5,0
„Rauh“ γ_q	1,0	2,0

Tab. 5.2: Teilsicherheitsbeiwerte γ_q in Abhängigkeit zur Kontaktsituation der Grenzfälle 1 bzw. 2 und der Oberflächenstruktur des geotextilen Filterelementes unter laminaren Durchströmungsbedingungen mit $i < 3$

Bedingt durch die für hydraulische Gefälleverhältnisse mit $i \neq 1$ nicht unmittelbar gegebene Vergleichbarkeit der Parameter „q“ und „k“ stellt die Abminderung des am fabrikneuen Geotextils bestimmten charakteristischen Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes k_v durch Division mit γ_q für laminare Durchströmungsverhältnisse und $i < 3$ einen auf der sicheren Seite liegenden Ansatz dar. Der Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit erfolgt mit dem Bemessungswert k_{vd} in gewohnter Art und Weise, z. B. Bemessung nach [0], [0].

Die Größe der durch Division mit γ_q vorgenommenen Abminderung von k_v resultiert aus einer Überführung der in Abb. 5.8 enthaltenen Verhältniswerte von q_{10} zum Zeitpunkt t_3 . Für Kontaktverhältnisse analog Grenzfall 1 entspricht die hydraulische Leistungsfähigkeit der Systeme HB 2/2 und NP 2/2 einem Verhältnis von 1 : 3 -Teilsicherheitsbeiwerte γ_q für oberflächlich „glatte“ und „rauhe“ geotextile Filter im Grenzfall 1-. Bei Abweichungen von der Bemessungsvorgabe des Intimate Contact nach Grenzfall 2 erfolgt bei HB 2/2 ein Rückgang von q_{10} auf etwa 60 % des Wertes im Grenzfall 1. Ausgerichtet am Basiswert des Grenzfalles 1 (NP 2/2) resultiert hieraus der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_q = 5$ für Geotextilien mit glatter Vliesstoffoberfläche im Grenzfall 2. Die Auswirkungen der Kontaktverhältnisse des

Grenzfalles 2 führen bei NP 2/1 zu einer Abnahme von q_{10} im Verhältnis 1 : 0,42, bleiben aber dennoch oberhalb der Werte von q_{10} von HB 2/2 im Grenzfall 1, wodurch sich $\gamma_q = 2$ für Geotextilien mit einer rauhen Oberflächenstruktur im Grenzfall 2 ableiten läßt.

Der Nachweis der mechanischen Filterwirksamkeit des geosynthetischen Filterelementes kann parallel durch Ansatz der in der Praxis gebräuchlichen Bemessungskriterien vorgenommen werden. Mit Hinweis auf die Durchflußraten der Systeme HB 1 und NP 3 in Abb. 5.10 ist hierzu festzustellen, daß eine Öffnungsweite vorh. $O_{90} > \min O_{90}$ nicht automatisch den Anstieg der hydraulischen Leistungsfähigkeit des Filtersystems zur Folge hat. Gleiches gilt für Öffnungsweiten vorh. $O_{90} < \min O_{90}$, die jedoch auch Belange der Kolmations-sicherheit tangieren können.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen gestatten mit Basis der auf grundsätzliche strukturelle Unterschiede zwischen mineralischen Kornfiltern und geosynthetischen Filterelementen ausgerichteten theoretischen und praktischen Modellbildung erstmalig eine

Quantifizierung der Einflüsse unterschiedlicher Kontaktsituationen auf das Wasserdurchlässigkeitsverhalten von Filtersystemen mit Geotextilien. Die Übertragbarkeit der in den großmaßstäblichen Durchlässigkeitsversuchen beobachteten Funktionsweisen auf in-situ Verhältnisse wird hierbei durch Ausgrabungen geotextiler Filter bzw. im Feld vorhandener Bedingungen nachgewiesen.

Begründet im voneinander abweichenden Verhalten unterschiedlicher Geotextilien unter sonst gleichen Bedingungen wurden spezielle Untersuchungen zu werkstoffspezifischen Durchströmungswiderständen vorgenommen.

Im Ergebnis der auf Belange geosynthetischer Filterelemente ausgerichteten Untersuchungen kann festgestellt werden, daß:

- Die Funktionsweise von Filtersystemen mit Geotextilien über bisherige Betrachtungen hinaus im Modell der Durchströmungswiderstände deutlich wirklickeitsnäher abgebildet werden kann.
- Abweichungen von der Bemessungsvorgabe des Intimate Contact zu einer Erhöhung des Durchströmungswiderstandes in der Kontaktzone führen.
- Die Reduzierung der Wasserableitfähigkeit als Folge der Hohlraumverfüllung in der Grenzfläche Basiserdstoff/geosynthetischer Filter mit dem Begriff der Scheinbaren Kolmation gekennzeichnet werden kann.
- Die Oberflächenrauigkeit eines konventionellen geotextilen Filters Auswirkungen der Scheinbaren Kolmation durch die Behinderung von Umlagerungsvorgängen in der Kontaktzone reduzieren kann.
- Die grundsätzliche, von der Kontaktsituation unabhängige hydraulische Leistungsfähigkeit geosynthetischer Filterelemente entscheidend durch das Auftreten werkstoffspezifischer Durchströmungswiderstände beeinflusst wird.
- Die infolge Sickerwasserzustrom einsetzende hydraulisch bedingte Verfüllung von Hohlräumen in der Grenzfläche für laminare Bedingungen nicht zwangsläufig eine Einschränkung des Bodenrückhaltevermögens oder Entmischungsvorgänge des Basiserdstoffes nach sich zieht.

Die zugrunde gelegte modifizierte Modellierung der Funktionsweise erlaubt durch den Ansatz eines sich aus Einzelwiderständen zusammensetzenden Summenparameters der Durchströmungswiderstände sowohl die globale, als auch differenzierte Betrachtung des Systemverhaltens. Als Einzelanteile des Summenparameters der Durchströmungswiderstände sind relevant:

- (1) Durchströmungswiderstand im Basiserdstoff unmittelbar vor der Kontaktzone
- (2) Eintrittswiderstand des Sickerwassers aus dem Basiserdstoff in den geotextilen Filter
- (3) Durchströmungswiderstand des geosynthetischen Filterelementes selbst.

Mit der Variation des in der Grenzfläche eingestellten Kontaktes zwischen Basiserdstoff und geosynthetischem Filter -Einzelwiderstand (2)-, vollflächig im Zuge des Einbaues -Grenzfall 1- und hydraulisch durch die Einwirkungen des Sickerwasserstromes -Grenzfall 2-, kann die Analyse des Einflusses der Kontaktverhältnisse auf die Funktionsweise von Filtersystemen mit Geotextilien im Modell der Durchströmungswiderstände vorgenommen werden.

Die unter sonst gleichen Bedingungen beobachteten Abweichungen im Wasserdurchlässigkeitsverhalten unterschiedlicher Geotextilien lassen über die Bewertung des Einflusses der Kontaktsituation auf die Funktionsweise hinaus die Feststellung zu, daß die

Präsenz werkstoffspezifischer Durchströmungswiderstände sich deutlich signifikanter im Systemverhalten auswirkt als bislang angenommen.

Die sich durch Abweichungen von der Bemessungsvorgabe des Intimate Contact einstellende Scheinbare Kolmation ist durch das Auftreten des Prozesses der Kontaktmobilität -Kornumlagerungsvorgänge in der Kontaktzone des Basiserdstoffes infolge Hohlraumverfüllung- gekennzeichnet und tritt in Abhängigkeit zur Oberflächenrauigkeit des geosynthetischen Filterelementes unterschiedlich ausgeprägt zu tage. Die Oberflächenbeschaffenheit des geotextilen Filters bewirkt hierbei die Ausbildung einer Faser-Boden-Verbundzone im Kontaktbereich. Diese führt bei einer rauhen Vliesstoffoberfläche zu einer deutlich wirkungsvolleren Behinderung der Kontaktmobilität und äußert sich im Systemverhalten in einer größeren hydraulischen Leistungsfähigkeit.

Über die Oberflächenrauigkeit als werkstoffspezifischem Durchströmungswiderstand -Einzelwiderstand (3)- hinaus, ist die Präsenz von für Kunststoffe charakteristischen Benetzungswiderständen eine weitere, bislang jedoch nicht ausreichend berücksichtigte Einflußgröße auf die hydraulische Leistungsfähigkeit eines Filtersystems. Mit Grundlage der auf umfangreichen Testreihen basierenden Einteilung in die Kategorien „voll- bzw. teilflächig“ „saugender“ und „stauender“ Vliesstoffe sind erste, differenzierte Bewertungskriterien für die Benetzungseigenschaften geotextiler Filter verfügbar.

Die übergreifende Analyse der Untersuchungsergebnisse gestattet durch die Angabe von Teilsicherheitsbeiwerten eine den Verhältnissen in-situ deutlich näherstehende Formulierung von Randbedingungen für in der Praxis gebräuchliche Bemessungskriterien zum Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit. Diese leiten sich aus einer bislang in dieser Art noch nicht vorgenommenen differenzierten Gegenüberstellung von Einwirkungen und Widerständen auf bzw. von Filtersystemen her.

Ansatzpunkte weiterer Untersuchungen zum Wasserdurchlässigkeitsverhalten geosynthetischer Filterelemente bestehen beispielsweise in der ergänzenden Modellierung und Untersuchung des Einflusses nicht-laminarer, z. B. turbulenter oder wechselseitiger Durchströmungsverhältnisse auf die Funktionsweise.

Hierdurch könnten über diese Arbeit hinausreichende Erkenntnisse zu möglichen Versagensmechanismen infolge des Verlustes des Bodenrückhaltevermögens oder von Entmischungsprozessen verursacht durch Verfüllvorgänge in der Kontaktzone umgelagerter Basiserdstoffe erzielt werden.

Die auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen vorgenommene Einteilung der Oberflächenbeschaffenheit in sogenannte „Glatte“ und „Rauhe“ geosynthetische Filterstrukturen, ist durch die praktisch nutzbare Angabe von Kenngrößen bzw. -werten zu hinterlegen. Hierfür wären beispielsweise Untersuchungen zum Reibungsverhalten gegen eine noch zu definierende „Standardoberfläche“ nach oder in Anlehnung an DIN EN ISO E 12957 (04/98) denkbar.

Wünschenswert wäre weiterhin eine noch tiefergehende Untersuchung der Benetzungseigenschaften geotextiler Filterelemente, die nach dem Vorliegen weiterführender Erkenntnisse in die Formulierung einer Prüfvorschrift münden könnte.

Literatur

- [0] Abromeit, H.-U.; Heibaum, M. (1996): Stressing of geosynthetics during installation and construction on site: Installation of geosynthetics in waterways; Proceedings of the First European Geosynthetics Conference EuroGeo 1; Maastricht 1996; (Ed.) M. B. de Groot, G. den Hoedt, R. J. Termaat
- [0] Batereau, C. (1973): Grundlagen für den Einsatz flächenförmiger Kunststoffelemente im Erdwasserbau; Technische Universität Dresden, Fakultät Bau-, Wasser- und Forstwesen; Dissertation A
- [0] Batereau, C. (1981): Textile Filter im Erd- und Wasserbau und deren Wechselwirkung mit Lockergesteinen; Technische Universität Dresden, Fakultät für Bau-, Wasser- und Forstwesen; Dissertation B
- [0] Batereau, C. (1982): Kolmation textiler Materialien; Bauplanung-Bautechnik, Heft 12
- [0] Batereau, C. (1988): Beitrag zur gewünschten Kolmation an Geotextilien; 1. Kongreß Kunststoffe in der Geotechnik K-Geo 88, Hamburg; (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau
- [0] Batereau, C. (1992): Comparison of existing granular filter criteria; Proceedings of the First International Conference on Geo-filters '92; (Ed.) J. Brauns, M. Heibaum, U. Schuler; Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering; Karlsruhe 1992; A. A. Balkema 1993
- [0] Batereau, C. (1993): Beitrag zur hydraulischen Wechselwirkung zwischen Boden und Geotextilfilter; 3. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, München 1993; Sonderheft Geotechnik; (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau
- [0] Batereau, C.; Baumbusch, J. (1996): Contribution according to the behaviour of geosynthetic filters in case of colmation and the borderline of occurrence; Proceedings of the First European Geosynthetics Conference EuroGeo 1, Maastricht 1996; (Ed.) M. B. de Groot, G. den Hoedt, R. J. Termaat
- [0] Batereau, C.; Weiss, W.; Baumbusch, J. (1996): Einflüsse der hydraulischen Beanspruchung und der Kornstrukturen auf die Durchlässigkeit von Geosynthetics; Tagungsband Baugrundtagung 1996, Berlin; (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Geotechnik
- [0] Batereau, C.; Weiss, W.; Baumbusch, J. (1997): Consequences of the phenomena of adjustment and transport of mineral grains within filters and drainage systems; Proceedings XIV ICSMFE International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg 1997
- [0] Baumbusch, J. (1997): Design of Filter-Systems with Geosynthetics: Millions of Bytes to describe Intimate Contact and Apparent Colmation; Proceedings XI Young Geotechnical Engineers' Conference of the ISSMFE, -Geotechnical Engineers and Computers-, Madrid 1997
- [0] Berkhout, H.-C. (1993): Relevance of thickness and manufacturing process of geotextile filters in filter criteria in relation to their application; AKZO NOBEL Technical Report, Civil Engineering and Industrial Systems (unpublished)
- [0] Beyer, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve; Wasserwirtschaft & Wassertechnik, Heft 6

- [0] Bhatia S. K.; Smith, J. L. (1996): Geotextile Characterization and Pore-Size Distribution: Part I. - A Review of Manufacturing Processes; Geosynthetics International 1996, No. 1
- [0] Bhatia S. K.; Suits L. D. (1996): Recent Developements in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites; ASTM STP 1281; (Ed.) Shobha K. Bhatia, L. David Suits; American Society for Testing and Materials, Philadelphia
- [0] Billing, J. W.; Greenwood, J. H.; Small, G. D. (1990): Chemical and mechanical durability of geotextiles; Proceedings 4th International conference on geotextiles, geomembranes and related products; The Hague 1990
- [0] Blinde, A.; Brauns, J. (1989): Alterung von Filterrohren; Ingenieurtiefbau, Juli 1989
- [0] Bräu, G. (1996): Damage of geosynthetics during installation - Experience from real sites and research works; Proceedings of the First European Geosynthetics Conference EuroGeo 1, Maastricht 1996; (Ed.) M. B. de Groot, G. den Hoedt, R. J. Termaat
- [0] Busch, K.-F.; Batereau, C. (1974): Beitrag zum Langzeitverhalten von Kunststoffolien; Wasserwirtschaft & Wassertechnik, Heft 9
- [0] Busch, K.-F.; Luckner, L.; Tiemer K. (1993): Geohydraulik, Lehrbuch der Hydrogeologie Band 3, 3. neubearbeitete Auflage; Gebrüder Borntraeger; Berlin, Stuttgart
- [0] Chang, D.; Nieh, Y. C. (1995): Significance of Gradient Ratio Test for Determining Clogging Potential of Geotextiles; ASTM STP 1281; (Ed.) Shobha K. Bhatia, L. David Suits; American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1996
- [0] Christopher, B. R.; Holtz, R. D. (1984): Geotextile Engineering Manual; Federal Highway Association FHWA DTFH 61-80-C-0094, Washington DC.
- [0] Christopher, B. R.; Holtz, R. D.; Fischer, G. R. (1992): Research Needs in Geotextile Filter Design; Proceedings of the First International Conference on Geo-filters '92; (Ed.) J. Brauns, M. Heibaum, U. Schuler; Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering; Karlsruhe 1992; A. A. Balkema 1993
- [0] Davidenkoff, R. (1976): Anwendung von Filtern im Wasserbau; Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München, Düsseldorf
- [0] Dierickx, W. (1994): Wettability Resistance of Geotextiles used as envelope for subsurface drain pipes; Laboratory of Agricultural Water Management; Agricultural Research Centre Gent; Research Station for Agricultural Engineering, Merelbeke, Belgium
- [0] Eichenauer, T.; Faure, Y.H.; Farkouh, B. (1994): Filtration Behaviour of Geotextiles in Slurries; Proc. 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and related products, Singapore 1994
- [0] Elsharif, A. M.; Lovell, C. W. (1997): Pore structure and long term performance of nonwoven geotextile filters; Proceedings XIV ICSMFE International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg 1997
- [0] Elste, K.-U.; Dettmann, H. (1997): Laboruntersuchungen zu Durchströmungswiderständen bei der Anwendung von geosynthetischen Filterelementen im Grund- und Wasserbau; Studienarbeit an der Bauhaus Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Strömungsmechanik, (unveröffentlicht)

- [0] Fillibeck, J.; Heyer, D.; Berkhout, H. C. (1993): Beitrag zur Filterwirksamkeit von Geotextilien unter geringen hydraulischen Beanspruchungen; 3. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, München 1993; Sonderheft Geotechnik; (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau
- [0] Fischer G. R.; Holtz R. D.; Christopher B. R. (1995): Evaluating Geotextile Pore Structure; ASTM STP 1281; (Ed.) Shobha K. Bhatia, L. David Suits; American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1996
- [0] Fischer, G.R.; Holtz, R. D.; Christopher, B. R. (1994): Filtration Behaviour of Broadly Graded, Cohesionless Tills; Proceedings 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and related products, Singapore 1994
- [0] Floss, R. (1997) (Hrsg.): Informationsblatt Nr. 3; Oktober 1997; Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Fachsektion „Kunststoffe in der Geotechnik“, München 1997
- [0] Floss, R.; Bräu, G. (1992): Beschädigungsanfälligkeit von Geotextilien; 2. Kongreß Kunststoffe in der Geotechnik K-Geo 92, Luzern; (Hrsg.) Schweizerischer Verband der Geotextilfachleute
- [0] Gartung, E.; Kossendey, Th.; Murray, R. T. (1994): Long Term Function of Nonwovens: Large Scale Performance Test; Proc. 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and related products, Singapore 1994
- [0] Geiseler, W.-D. (1967): Über die Strömungsvorgänge bei Vertikalfilterrohrbrunnen mit einfachen Kiesschüttungen unter besonderer Berücksichtigung der Leistungssteigerung durch Entsandern; Technische Universität Berlin, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft; Mitteilung Nr. 65; (Hrsg.) Preß H.
- [0] Giroud, J.-P. (1986): From geotextiles to geosynthetics: A revolution in geotechnical engineering; Proceedings of the 3rd International Conference on Geotextiles, Vienna 1986
- [0] Giroud, J.-P. (1995a): Lessons learned from the failure of a pond bank protection with Geotextile; Short Course Handout, One-Day-Seminar „Geosynthetics: Lessons learned from failures“, in Conjunction with Geosynthetics '95, Nashville 20. February 1995
- [0] Giroud, J.-P. (Ed.) (1995b): Geosynthetics: Lessons learned from failures; Short Course Handout, One-Day-Seminar „Geosynthetics: Lessons learned from failures“, in Conjunction with Geosynthetics '95, Nashville 20. February 1995
- [0] Grap, T. (1997): Ausgrabungen als eine Form der Beobachtungsmethode zur Untersuchung der Funktionstüchtigkeit von Geokunststoffen in Entwässerungseinrichtungen der Deutschen Bahn AG; Diplomarbeit an der Bauhaus Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Grundbau, (unveröffentlicht)
- [0] Hässelbarth, U.; Lüdemann, D. (1967a): Die biologische Verockerung von Brunnen durch Massenentwicklung von Eisen- und Manganbakterien Teil I; Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau, bbr, Heft 10
- [0] Hässelbarth, U.; Lüdemann, D. (1967b): Die biologische Verockerung von Brunnen durch Massenentwicklung von Eisen- und Manganbakterien Teil II; Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau, bbr, Heft 11
- [0] Heerten, G. (1981): Geotextilien im Wasserbau -Prüfung, Anwendung, Bewährung; Universität Hannover, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen; Mitteilungen Heft 52; Dissertation

- [0] Heerten, G. (1982): Dimensioning the filter properties of geotextiles considering long-term conditions; Proceedings 2. International Conference On Geotextiles, Las Vegas 1982
- [0] Heerten, G. (1995): Lessons learned from the failure of revetment systems on the bank of a canal; Short Course Handout, One-Day-Seminar „Geosynthetics: Lessons learned from failures“, in Conjunction with Geosynthetics '95, Nashville 20. February 1995
- [0] Heibaum, M. (1995): Bericht über die 5. Internationale Konferenz der IGS in Singapur 1994 „Hydraulic Applications“; 4. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, München 1995; Sonderheft Geotechnik; (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Geotechnik
- [0] IVG Interessenverband Geokunststoffe (1997): Bauen mit Geokunststoffen: Sicher und wirtschaftlich; Informationsblatt September 1997
- [0] Kisskalt, J. (1992): Kunststoffe in der Geotechnik: Deponiebau mit Geotextilien; Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Landesgewerbeanstalt Bayern (LGA), Heft 68
- [0] Kisskalt, J.; Kossendey, Th. (1994): Untersuchungen zur Langzeitfilterwirksamkeit von Geotextilien unter statischer und dynamischer Beanspruchung; Straße und Autobahn, Heft 4
- [0] Koerner, G.-R.; Koerner, R.-M. (1990): The installation survivability of geotextiles and geogrids; Proceedings 4th International conference on geotextiles, geomembranes and related products, The Hague 1990
- [0] Koerner, G.-R.; Koerner, R.-M. (1995): Lessons learned from Geocomposite Edge Drain Clogging Due to Improper Installation; Short Course Handout, One-Day-Seminar „Geosynthetics: Lessons learned from failures“, in Conjunction with Geosynthetics '95, Nashville 20. February 1995
- [0] Koerner, R.-M. (1994): Designing with Geosynthetics, 3rd Edition; Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632
- [0] Koerner, R.-M.; Ko, F. K. (1982): Laboratory studies on long-term drainage capability of geotextiles; Proceedings of the 2. International Conference on Geotextiles, Las Vegas 1982
- [0] Koerner, R.-M.; Koerner, G.-R.; Fahim, A.-K.; Wilson-Fahmy R.-F. (1993): Long Term Performance of Geosynthetics in Drainage Applications; Final Report prepared for National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Board
- [0] Köhler, H. J. (1992): The influence of hydraulic head and hydraulic gradient on the filtration process; Proceedings of the First International Conference on Geo-filters '92; (Ed.) J. Brauns, M. Heibaum, U. Schuler; Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Karlsruhe 1992; A. A. Balkema 1993
- [0] Kossendey, Th.; Gartung, E.; Lawson, C. (1996a): Long-Term Performance Tests for Verification of Current Filter Criteria; Proceedings Geofilters' 96, Montréal, Québec, Canada; (Ed.) J. Lafleur, A.-L. Rollin
- [0] Kossendey, Th.; Gartung, E.; Schmidt, St. (1996b): Microbiological Influences on The Long-Term Performance of Geotextile Filters; Proceedings Geofilters' 96, Montréal, Québec, Canada; (Ed.) J. Lafleur, A.-L. Rollin

- [0] Lafleur, J.; Rollin, A. L.; Mlynarek, J. (1990): Clogging of geotextiles under pumping loads; Proceedings 4th International conference on geotextiles, geomembranes and related products, The Hague 1990
- [0] Lieberenz, K. (1984): Probleme der Filterstabilität von Entwässerungsanlagen des Bahnkörpers unter Berücksichtigung von Geotextilien; Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ Dresden, Fakultät für Technik und Naturwissenschaften; Dissertation A
- [0] Lieberenz, K. (1986): Stabilität von Filtern in Entwässerungsanlagen des Bahnkörpers; Signal und Schiene, Heft 3
- [0] List, F. (1984): Langzeitbeständigkeit geotextiler Filter aus Uferdeckwerken von Bundeswasserstraßen; 1. Nationales Symposium Geotextilien im Erd- und Grundbau, Mainz 1984
- [0] Ludewig, M. (1965): Die Gültigkeitsgrenzen des Darcyschen Gesetzes bei Sanden und Kiesen; Wasserwirtschaft-Wassertechnik, Heft 12; Beitrag aus der Hochschule für Bauwesen Leipzig
- [0] Mägel, M. (1997): Prüfverfahren und Hinweise zur Qualitätssicherung für Geotextilien und artverwandte Produkte; 5. Informations- und Vortragsveranstaltung „Kunststoffe in der Geotechnik“, München 1997; Sonderheft Geotechnik; (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Geotechnik
- [0] Markert, Th. (1990): Wirkung von eisenhaltigem Wasser auf Geotextilien; Technische Textilien 33, 1990, 5/6
- [0] Maßmeier, L. (1995): Bemessungsgrundlagen der stationären Infiltration von Grundwasser -Untersuchungen an Sanden-; Universität Gesamthochschule Essen, Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Heft 21, Dissertation
- [0] Metcalfe, R. C.; Holtz, R. D.; Allen, T. M. (1995): Field Investigations to Evaluate the Long-Term-Separation and Drainage Performance of Geotextile Separators; Proceedings Geosynthetics '95, Nashville/Tennessee
- [0] Mlynarek, J. (1996): Geotextile filters: Which criteria is the best ?; Geotechnical Fabrics Report, August 1996
- [0] Mlynarek, J.; Lafleur, J.; Lewandowski, J. B. (1990b): Field study on long term geotextile filter performance; Proceedings 4th International conference on geotextiles, geomembranes and related products, The Hague 1990
- [0] Mlynarek, J.; Rollin, A. L. (1995): Bacterial Clogging of Geotextiles - Overcoming Engineering Concerns; Proceedings Geosynthetics '95, Nashville/Tennessee
- [0] Mlynarek, J.; Rollin, A. L.; Lafleur, J.; Bolduc, G. (1990a): Microstructural Analysis of a Soil/Geotextile System; ASTM STP 1076; (Ed.) I. D. Peggs; American Society for Testing and Materials, Philadelphia
- [0] Mühling, W. (1989): Über die Anwendung porenmäßig abgestufter Vliesstoffe beim Ausbau von künstlichen Wasserstraßen; Universität Hannover, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Heft 69; Dissertation
- [0] Müller, B.; Volland G. (1997): Bestimmung von pH-Werten im Boden - Bedeutung für die Abschätzung der Lebensdauer von Geotextilien auf Basis von Polyestern; 5. Informations- und Vortragsveranstaltung „Kunststoffe in der Geotechnik“, München 1997; Sonderheft Geotechnik; (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Geotechnik

- [0] Roelofs, F. (1963): Niederländische Erfahrungen mit Kunststoffen im Seebau; Wasser und Boden, Heft 10
- [0] Rollin, A. L. (1996): Bacterial Clogging of Geotextiles; Proceedings Geofilters '96, Montréal, Québec, Canada; (Ed.) J. Lafleur, A.-L. Rollin
- [0] Rollin, A. L.; Broughton, R. S.; Bolduc, G. F. (1987): Thin synthetic envelope materials for subsurface drainage tubes; Geotextiles and Geomembranes - Special Issue on Agricultural Drainage, Vol. 5 No. 2
- [0] Rollin, A. L.; Lombard, G. (1988): Mechanisms Affecting Long Term Filtration Behaviour of Geotextiles; Geotextiles and Geomembranes, Vol. 7 No 1 & 2
- [0] Rollin, A. L.; Masonave, J.; Dallaire, G. (1977): Etudes des proprietes hydrauliques des membranes non-tissees; Proceedings Coll. International Sols et Textiles, Paris 1977
- [0] Rollin, A.; Lombard, G.; Mlynarek, J.; Vermeersch, O. (1993): Geotextile Thickness Influence On Filtration Design Criteria; Ecole Polytechnique of Montréal, SAGEOS, Revised edition, Technical Report
- [0] Rüegger AG; Institut für Geotechnik der ETH Zürich (1992): Hydraulisches Langzeitverhalten von Geotextilien in Entwässerungen; Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Straßenbau, Forschungsaufträge 21/86 und 24/92
- [0] Saathoff, F. (1987a): Marktformen und Grundsätzliches zur Wirkungsweise von Geotextilien; Universität Hannover, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen; Sonderdruck aus Heft 64
- [0] Saathoff, F. (1987b): Untersuchungen zum Langzeit-Filterverhalten von Geotextilien; Universität Hannover, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen; Sonderdruck aus Heft 65
- [0] Saathoff, F. (1987c): Filterwirksamkeit gedehnter Geotextilien -gerätetechnische Entwicklungen im Franzius-Institut-; Universität Hannover, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen; Sonderdruck aus Heft 65
- [0] Saathoff, F. (1988): Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erd- und Wasserbau; Seminar am 26./27. April 1988; Informationsberichte des bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft
- [0] Saathoff, F. (1994): Geokunststoffe; 49. DVWK Seminar; IWU Magdeburg
- [0] Saathoff, F.; Zitscher, F.-F. (1996): Geokunststoffe in der Geotechnik und im Wasserbau; Sonderdruck: Auszug aus dem Grundbautaschenbuch, 5. Auflage, Teil 2, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [0] Santvoort van, Gerard P. T. M. (1994) (Ed.): Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering; A. A. Balkema / Rotterdam / Brookfield
- [0] Schneckenberg, H.; Batereau, C. (1979): Alterungsbeständigkeit von im Tief- und Wasserbau eingesetzten technischen Textilien; Bauplanung-Bautechnik, Heft 2
- [0] Schneider, K.-J. (1992): Bautabellen mit Berechnungshinweisen; Werner-Verlag, WIT 40, 10. Auflage
- [0] Schröder, H. F.; Bahr, H.; Lorenz E. (1997): Zur Bedeutung der Oxidation von Polyolefinwerkstoffen im Erdbau; 5. Informations- und Vortragsveranstaltung „Kunststoffe in der Geotechnik“, München 1997; Sonderheft Geotechnik; (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau

- [0] Schröder, H. F.; Kneip, G. (1993): Untersuchungen zur Beständigkeit von PET-Geotextilien in alkalischen Erdstoffen; 3. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, München 1993; Sonderheft Geotechnik; (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau
- [0] Schuler, U.; Brauns, J. (1992): Behaviour of coarse and well-graded filters; Proceedings of the First International Conference on Geo-filters '92; (Ed.) J. Brauns, M. Heiblum, U. Schuler; Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering; Karlsruhe 1992; A. A. Balkema 1993
- [0] Sichardt, W. (1952): Kies- und Sandfilter im Grund- und Wasserbau; Die Bau-technik, Heft 3
- [0] Technische Hochschule Leipzig (1983): Konstruktion und Bemessung textiler Vliese als selbständiger Drain; Bericht zur Forschungs- und Entwicklungsarbeit; VEB VTK Leipzig 1983
- [0] Teindl, H. (1980): Filterkriterien von Geotextilien; Bundesministerium für Bauten und Technik, Wien (Austria); Straßenforschung Heft 153
- [0] Terzaghi, K.; Peck, R. B. (1961): Die Bodenmechanik in der Baupraxis; Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, Deutsche Übersetzung
- [0] Troost G. H.; den Hoedt G. (1984): Widerstandsfähigkeit von Geotextilien gegen Angriffe physikalischer, chemischer und mikrobiologischer Art; 1. Nationales Symposium Geotextilien im Erd- und Grundbau, Mainz 1984
- [0] Troost, G. H.; Ploeg, N. A. (1990): Influence of weaving structure and coating on the degree of mechanical damage of reinforcing mats and woven geogrids, caused by different fills, during installation; Proceedings 4th International conference on geotextiles, geomembranes and related products, The Hague 1990
- [0] Voskamp, W.; Wichern, H. A. M.; van Wijk W. (1990): Installation problems with geotextiles, an overview of producers experience with designers and contractors; Proceedings 4th International conference on geotextiles, geomembranes and related products, The Hague 1990
- [0] Watn, A.; Zeniti, M. (1997): Verformung und Einbaubeschädigung von Vliesen bei geringtragfähigem Untergrund; 5. Informations- und Vortragsveranstaltung „Kunststoffe in der Geotechnik“, München 1997; Sonderheft Geotechnik; (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Geotechnik
- [0] Watts, G. R. A.; Brady K. C. (1990): Site damage trials on geotextiles; Proceedings 4th International conference on geotextiles, geomembranes and related products, The Hague 1990
- [0] Wilmers, W. (1993): Beständigkeit von Geotextilien und Geokunststoffen gegen chemische Beanspruchung - Überblick; 3. Informations- und Vortragsveranstaltung „Kunststoffe in der Geotechnik“, München 1993; Sonderheft Geotechnik; (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau
- [0] Wilmers, W. (1997): Hydrolyse von Polyesterprodukten - Diskussionsstand; 5. Informations- und Vortragsveranstaltung „Kunststoffe in der Geotechnik“, München 1997; Sonderheft Geotechnik; (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Geotechnik
- [0] Wittmann, L. (1980): Filtrations- und Transportphänomene in porösen Medien; Universität Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik, Heft 86

- [0] Wittmann, L.; Heerten, G. (1984): Vergleichende Betrachtung zum Filterverhalten mineralischer und textiler Filter; 1. Nationales Symposium Geotextilien im Erd- und Grundbau, Mainz 1984
- [0] Ziani, N; Lafleur, J.; Mlynarek, J. (1995): Efficiency of Suspension Filtration by Nonwoven Geotextiles; Proceedings Geosynthetics '95, Nashville / Tennessee
- [0] Ziems, J. (1967): Neue Erkenntnisse hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit der Lockergesteine gegenüber Wirkungen des Sickerwassers -I.- Zur Klassifizierung der mechanischen Erdstoffverformungen durch Wirkungen des Sickerwassers; Wasserwirtschaft & Wassertechnik, Heft 2
- [0] Zitscher, F.-F. (1963): Daueranwendung von Geweben aus synthetischen Fasern im Wasserbau; Wasser und Boden, Heft 10

- [0] Anwendungsrichtlinie (1978): Einsatz textiler Stoffe im Tiefbau; Bauakademie der DDR, Institut für Ingenieur- und Tiefbau, Leipzig
- [0] ASTM D 4439-95: Terminology for Geosynthetics; ASTM Section 4 Construction; Annual Book of ASTM Standards Volume 04.09 - Soil and Rock II, Geosynthetics; American Society for Testing and Materials, ASTM, Publication Code Number: 01-040996-38; (1996)
- [0] ASTM D 4716-95: Test Method for Constant Head Hydraulic Transmissivity (In Plane Flow) of Geotextiles and Geotextile Related Products; ASTM Section 4 Construction; Annual Book of ASTM Standards Volume 04.09 - Soil and Rock II, Geosynthetics; American Society for Testing and Materials, ASTM, Publication Code Number: 01-040996-38; 95 (1996)
- [0] ASTM D 5109-90: Test Method for Measuring the Soil-Geotextile System Clogging Potential (By the Gradient Ratio); ASTM Section 4 Construction; Annual Book of ASTM Standards Volume 04.09 - Soil and Rock II, Geosynthetics; American Society for Testing and Materials, ASTM, Publication Code Number :01-040996-38; (1996)
- [0] ASTM D 5141-91: Test Method for Determining Filtering Efficiency and Flow Rate of a Geotextile for Silt Fence Application Using Site Specifications; ASTM Section 4 Construction; Annual Book of ASTM Standards Volume 04.09 - Soil and Rock II, Geosynthetics; American Society for Testing and Materials, ASTM, Publication Code Number: 01-040996-38; 91 (1996)
- [0] ASTM D 653-90: Terminology Relating to Soil, Rock and Contained Fluids; ASTM Section 4 Construction; Annual Book of ASTM Standards Volume 04.08 - Soil and Rock I; American Society for Testing and Materials, ASTM, Publication Code Number: 01-040896-38; (1996)
- [0] ASTM Section 4 Construction (1996a): Annual Book of ASTM Standards Volume 04.08 - Soil and Rock I; American Society for Testing and Materials, ASTM, Publication Code Number: 01-040896-38; (1996)
- [0] ASTM Section 4 Construction (1996b): Annual Book of ASTM Standards Volume 04.09 - Soil and Rock II, Geosynthetics; American Society for Testing and Materials, ASTM, Publication Code Number: 01-040996-38; (1996)
- [0] BAW (1984): Richtlinie für die Prüfung von geotextilen Filtern im Verkehrswasserbau (RPG); Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- [0] BAW (1993a): Merkblatt Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen (MAG); Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

- [0] BAW (1993b): Technische Lieferbedingungen für geotextile Filter; Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- [0] CEN/TC 189/WG 2 (1997): N 102; „Geotextiles; Terminology, Identification“ 22.10.1997; Geosynthetics; Geotextiles, geotextile related-products, geomembranes and geomembrane-related products, Terms and their definitions (10th draft); NA Bau 05.15.00 „Geotextilien und verwandte Produkte SpA zu CEN/TC 189; 10. Normenvorschlag „Terms and their definitions“; Schriftstück Nr. 05.15 00 Nr. 59-97; (unveröffentlicht)
- [0] DIN 18196 (10/88): Erd- und Grundbau -Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke-; Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- [0] DIN 4022, Teil 1-3: Baugrund und Grundwasser -Benennen und Beschreiben von Boden und Fels-; Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- [0] DIN 60000 (01/69): Textilien -Grundbegriffe-; Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- [0] DIN EN ISO 12957 E Teil 1+2 (04/98): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte -Bestimmung der Reibungseigenschaften-; Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- [0] DIN ISO 10318 E (07/92): Geotextilien -Begriffe-; Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- [0] DIN V ENV 1997-1 (1996): Bauen in Europa, Geotechnik, Eurocode 7-1; Stand April 1996; Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- [0] DR (1987): Deutsche Reichsbahn, Anwenderkatalog Geotextilien im Eisenbahnbau; Deutsche Reichsbahn, (Hrsg.) Ingenieurbüro für Rationalisierung des Eisenbahnbaues
- [0] DR (1988): Deutsche Reichsbahn, Richtlinie Tiefenentwässerung, DR-A 2014; Ministerium für Verkehrswesen; (Hrsg.) Hauptverwaltung der Bahnanlagen der Deutschen Reichsbahn
- [0] DVGW (1970): Wasserversorgung Brunnen, Hinweise zur Verhütung der biologischen Brunnenverockerung; Merkblätter des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e. V. DVGW Eschborn, Merkblatt W 131
- [0] DVWK (1989): Anwendung und Prüfung von Kunststoffen im Erdbau und Wasserbau; Schriften des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. DVWK, Heft Nr. 76, 2. Auflage
- [0] DVWK (1992): Anwendung von Geotextilien im Wasserbau; Merkblätter des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. DVWK zur Wasserwirtschaft Nr. 221/1992
- [0] LAGA (1995): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen -Technische Regeln-; Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall Nr. 20; Erich Schmidt Verlag 1996
- [0] Ministerium für Verkehrswesen, Hauptverwaltung der Bahnanlagen (Hrsg.) (1980): Entwicklung funktionsbezogener Lösungen für Tiefenentwässerungen, Ausführlicher Abschlußbericht zur Forschungs- und Entwicklungsarbeit; Deutsche Reichsbahn, Ingenieurbüro für Rationalisierung des Eisenbahnbaues, DRM
- [0] Schweizerischer Verband der Geotextilfachleute (SVG) (Hrsg.) (1988): Das Geotextil-Handbuch, 2. Auflage; Voigt-Schild AG, Solothurn

- [0] Task Force #25 (1986+1989): Specification Guides; Joint Committee of AASHTO-American Association of State Highway and Transportation Officials- AGC-ARBTA, Washington, DC.
- [0] VSN-02-65 (1965): Anleitung für die Projektierung von Filtern für Wasserbauten; Ministerium für Energie und Elektrifizierung der UdSSR, Hauptverwaltung Bauvorhaben, Forschungsinstitut für Wasserbau; Verlag Energie, Moskau, Leningrad
- [0] WAPRO 4.04 Blätter 1-6 (1970): Nachweis der Beständigkeit von Erdstoffen gegenüber der Einwirkung der Sickerwasserströmung; Arbeitsblatt des VEB Projektierung Wasserwirtschaft
- [0] Wilmers, W., (Hrsg.) (1994): Merkblatt für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Straßenbaus; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; FGSV 535

Bezeichnungen

A	m ² , cm ²	durchströmte Fläche eines Bodenkörpers
A ₀	cm ²	angeströmte Fläche des Bodenkörpers in der „Weimarer Zelle“
A _{50, zul}	-	zulässiges Abstandsverhältnis des mittleren Korndurchmessers D ₅₀ eines Filters und d ₅₀ des zu schützenden Bodens
A _w	cm ²	wasserableitewirksame Filterfläche eines Geotextils in der Grenzfläche mineralischer Basiserdstoff / Geotextil
A _w (t ₁)	cm ²	wasserableitewirksame Filterfläche eines Geotextils in der Grenzfläche zum Zeitpunkt t ₁
A _{w1} , A _{w GF 1}	cm ²	wasserableitewirksame Filterfläche eines Geotextils in der Grenzfläche für Kontaktbedingungen gemäß Grenzfall 1
A _{w HB 1}	cm ²	wasserableitewirksame Filterfläche des geosynthetischen Filterelementes HB 1 für Kontaktbedingungen gemäß Grenzfall 2
A _{w NP 2/1}	cm ²	wasserableitewirksame Filterfläche des geosynthetischen Filterelementes NP 2 für Kontaktbedingungen gemäß Grenzfall 2
A _{w NP 2/2}	cm ²	wasserableitewirksame Filterfläche des geosynthetischen Filterelementes NP 2 für Kontaktbedingungen gemäß Grenzfall 1
D	-	Lagerungsdichte eines nichtbindigen Bodens
D _{Einbau}	-	Lagerungsdichte des Testbodens nach dem Einbau
D ₅₀	mm	Korndurchmesser d eines mineralischen Filters bei 50 Masse-% Siebdurchgang
d	mm	Schichtdicke d eines Geotextils
d	cm	Dicke einer Boden- oder mineralischen Filterschicht
d	mm	Korndurchmesser
d ₁₀ , d ₆₀ , d _i	mm	Korndurchmesser d bei 10, 60, i Masse-% Siebdurchgang
h	cm	Höhe über Bezugshorizont
h _{Einstau}	cm	Wassereinstauhöhe des Bodenkörpers in der „Weimarer Zelle“
h _{Stau}	mm	Aufstauhöhe einer Prüfflüssigkeit auf einem geotextilen Filterelement infolge Benetzungswiderstand
Δh	m, cm	Potentialgefälle
I _p	-	Plastizitätszahl eines bindigen Bodens
i	-	hydraulischer Gradient
i _m	-	mittlerer hydraulischer Gradient
i _{mEv}	-	mittlerer hydraulischer Gradient in der Meßebeene E _v
k	m/s	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert / -koeffizient
k _f	m/s	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert nach Darcy
k _F	m/s	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert eines geotextilen Filters senkrecht zu seiner Ebene (F = Filter)
k _h	m/s	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert eines Geotextils gemessen in (parallel zur) der Ebene
k _S	m/s	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert eines durch einen Filter zu schützenden Basiserdstoffes (S = Soil)
k _v	m/s	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert eines Geotextils gemessen senkrecht zu seiner Ebene
k _{vd}	m/s	Bemessungswert des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts k _v eines Geotextils nach Abminderung mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ _q
Δl	m, cm	Durchströmungslänge
m, m _{netto}	g/m ²	Flächengewicht eines Geotextils
m _{Ein}	%	Grad der Einlagerung von Bodenpartikeln in ein Geotextil in Bezug zum fabrikneuen Flächengewicht
m _{HB 2}	g/m ²	Flächengewicht des thermisch verfestigten Geotextils HB 2
n	%	Porenanteil

$O_{90}, O_{90,w}$	mm	Charakteristische/wirksame Öffnungsweite eines Geotextils für die 90% der Körnung eines definierten Testbodens durch das Geotextil zurückgehalten werden, $O_{90} = d_{90}$
O_w		
O_{85}, O_{95}, O_i	mm	Öffnungsweite eines Geotextils für die 85, 95, i % eines definierten Testbodens durch das Geotextil zurückgehalten werden
p	N/cm ²	piezometrischer Wasserdruck
Q	cm ³ /s	Wasserdurchflußmenge
Q_1	cm ³ /s	Wasserdurchflußmenge für Kontaktbedingungen gemäß Grenzfall 1
Q_2	cm ³ /s	Wasserdurchflußmenge für Kontaktbedingungen gemäß Grenzfall 2
Q_{10}	cm ³ /s	Wasserdurchflußmenge bezogen auf die Basistemperatur 10°C
$Q_{10 \text{ GF } 1}$	cm ³ /s	Wasserdurchflußmenge im Grenzfall 1 (Basistemperatur 10°C)
$Q_{10}(t_1)$	cm ³ /s	Wasserdurchflußmenge zum Zeitpunkt t_1 (Basistemperatur 10°C)
$Q_A, \text{Auslauf}$	cm ³ /s	Wasserdurchflußmenge an der Auslaufseite der „Weimarer Zelle“
Q_Z, Zulauf	cm ³ /s	Wasserdurchflußmenge an der Zulaufseite der „Weimarer Zelle“
$Q_{HB „i“}$	cm ³ /s	Wasserdurchflußmenge eines thermisch verfestigten geosynthetischen Filterelementes bezogen auf die Basistemperatur 10°C
$Q_{HB 1}$	cm ³ /s	Wasserdurchflußmenge des geosynthetischen Filterelementes HB 1 bezogen auf die Basistemperatur 10°C im Grenzfall 2
$Q_{NP „i“}$	cm ³ /s	Wasserdurchflußmenge eines mechanisch vernadelten geosynthetischen Filterelementes bezogen auf die Basistemperatur 10°C
q	cm ³ /(cm ² *s)	Wasserdurchflußrate
q_{10}	cm ³ /(cm ² *s)	Wasserdurchflußrate bezogen auf die Basistemperatur 10°C
$q_{10 \text{ GF } 1}$	cm ³ /(cm ² *s)	Wasserdurchflußrate im Grenzfall 1 (Basistemperatur 10°C)
$q_{10}(t_1)$	cm ³ /(cm ² *s)	Wasserdurchflußrate zum Zeitpunkt t_1 (Basistemperatur 10°C)
t	d, h, min, s	Dauer, z. B. Versuchsdauer
U, C_u	-	Ungleichförmigkeitszahl eines Bodens; Verhältnis d_{60}/d_{10}
U_I	-	Ungleichförmigkeitszahl eines durch Filter zu schützenden Bodens
U_{II}	-	Ungleichförmigkeitszahl eines mineralischen Filters
v	m/s	Fließ- / Durchströmungsgeschwindigkeit
v_m	m/s	mittlere Fließ- / Durchströmungsgeschwindigkeit
w	mm	Öffnungsweite eines Geotextils $\approx O_{90}$
η	-	Beiwert zur Abminderung des am fabrikneuen Geotextil bestimmten Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes k_v
η_G	-	Abminderungsfaktor für den an fabrikneuen Geweben und dünnen Vliesstoffen (Dicke bis ca. 2 mm) bestimmten Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_v
η_v	-	Abminderungsfaktor für den an fabrikneuen mechanisch verfestigten Vliesstoffen (Dicke ab ca. 2 mm) bestimmten Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_v
ρ_d	g/cm ³	Trockendichte eines Bodens
ρ_d	%	Trockendichte bezogen auf 100 % der einfachen Proctordichte
$\rho_d \text{ Ausbau}$	%	Trockendichte des Testbodens bezogen auf 100 % der einfachen Proctordichte beim Ausbau
$\rho_d \text{ Einbau}$	%	Trockendichte des Testbodens bezogen auf 100 % der einfachen Proctordichte nach dem Einbau
ρ_{pr}	g/cm ³	Proctordichte eines Bodens
γ_q	-	Teilsicherheitsbeiwert zur Abminderung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes k_v eines fabrikneuen Geotextils infolge der Kontaktverhältnisse in-situ
ϑ_Z	°C	Temperatur des Durchströmungsmediums in der „Weimarer Zelle“

A/1, A/2	Kategorien zur Beschreibung des Benetzungsverhaltens eines Geotextils
B/1, B/2	Kategorien zur Beschreibung des Benetzungsverhaltens eines Geotextils
$E_I - E_V$	Meßebenen E_I bis E_V in der „Weimarer Zelle“
E_I 1	Piezometermeßstelle 1 der Meßebene E_I in der „Weimarer Zelle“
GF 1, GF 2	Grenzfälle 1 und 2 unterschiedlicher Kontaktsituationen zwischen mineralischem Basiserdstoff und geosynthetischem Filterelement
HB 1, 2, 3	Thermisch verfestigte -„ heat bounded “- geotextile Filterelemente 1 bis 3
NP 1, 2, 3	Mechanisch vernadelte -„ needle punched “- geotextile Filterelemente 1 bis 3
HB 2/1	Geosynthetische Filterelemente HB 2 und NP 2 unter den
NP 2/1	Kontaktbedingungen des Grenzfalles 2 -hydraulisch eingestellter Kontakt-
HB 2/2	Geosynthetische Filterelemente HB 2 und NP 2 unter den Kontakt-
NP 2/2	bedingungen des Grenzfalles 1 -vollflächiger Kontakt nach dem Einbau-
R	Widerstand im Sinne des semi-probabilistischen Sicherheitskonzepts
S	Einwirkung im Sinne des semi-probabilistischen Sicherheitskonzepts
SL	Sickerlinie = Randstromlinie
SL_1	Sickerlinie für Kontaktbedingungen gemäß Grenzfall 1
SL_2	Sickerlinie für Kontaktbedingungen gemäß Grenzfall 2
$t_1 - t_4, t_i$	Zeitpunkte während eines Versuches / der Gebrauchsphase eines geosynthetischen Filterelementes

**Zur Kontaktsituation zwischen mineralischen Basiserdstoffen
und geosynthetischen Filterelementen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor - Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jürgen Baumbusch

Weimar 1998

**Zur Kontaktsituation zwischen mineralischen Basiserdstoffen
und geosynthetischen Filterelementen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor - Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jürgen Baumbusch
aus 74722 Buchen / Odenwald

Weimar 1998

Gutachter: 1. Professor Dr.-Ing. Werner Weiss
2. Dozent a. R. Dr.-Ing. habil. Christoph Batereau
3. Professor Dr.-Ing. Klaus Lieberenz

Tag der Disputation: 04. Dezember 1998

Vorwort des Verfassers

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Angestellter im AG Geotechnik der Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar.

Ohne die in jeder Hinsicht uneingeschränkte und dabei unbedingte Unterstützung der Menschen meines Vertrauens würde ich nicht dort stehen, wo ich heute angekommen bin.

Herrn Professor Dr.-Ing. Weiss danke ich für die stets wohlwollende Begleitung meiner Arbeit. Seine wissenschaftlichen Anregungen und menschlichen Ratschläge waren und sind von großem Wert für mich. Besonders während der letzten Phase der Manuskriptanfertigung vermochte sein der Arbeit entgegengebrachtes Interesse, immer neue Reserven in mir zu Tage zu fördern. Für die bevorstehende Zeit seines Ruhestandes sei es mir an dieser Stelle gestattet, Herrn Professor Dr.-Ing. Weiss alles Gute zu wünschen.

Die ständige Bereitschaft von Herrn Dozent a. R. Dr.-Ing. habil. Batereau, meinen wissenschaftlichen Horizont durch eine Vielzahl fachlicher Diskussionen, nicht selten bis in die Abendstunden hinein, zu erweitern, förderte meine Sensibilisierung gegenüber der Problematik und lenkte meinen Blick zum richtigen Zeitpunkt auf das Wesentliche. Hierfür bin ich Herrn Dozent a. R. Dr.-Ing. habil. Batereau zu großem Dank verpflichtet.

Herrn Professor Dr.-Ing. Lieberenz danke ich für die Begutachtung meiner Arbeit. Der Unterstützung von Herrn Professor Dr.-Ing. Lieberenz ist es zu verdanken, daß durch die Ausgrabung geosynthetischer Filterelemente eine Absicherung der aus den Laboruntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse durch einen Vergleich mit den Verhältnissen in-situ gelingen konnte.

Die Bereitstellung erheblicher Personal- und Sachmittel durch ein von der Firma Naue Fasertechnik finanziertes Forschungsvorhaben war maßgebende Grundlage für die Durchführung der Untersuchungen. Hierfür, sowie das stete Interesse am Fortgang der Arbeiten, bin ich der Firma Naue Fasertechnik zu besonderem Dank verpflichtet.

Weitere Herstellerfirmen von Geokunststoffen unterstützten die Untersuchungen durch Bereitstellung teils nicht unerheblicher Mengen Probenmaterials und gestatteten so die Ausdehnung der Testreihen auf ein breites Spektrum der auf dem Markt angebotenen Produkte (in alphabetischer Reihenfolge): Amoco, Du Pont, Fibertex, Huesker Synthetic und Rehau.

Herrn Dr.-Ing. Heibaum danke ich für die Möglichkeit, durch die Mitarbeit in der Untergruppe 2 des AK 5.1 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik weitere praxisrelevante Sachverhalte in die Untersuchungen einfließen lassen zu können.

Die Mitwirkung und Vorbereitungsarbeiten von Herrn Dipl.-Ing. (FH) Chilian im Geschäftsbereich Netz der Deutschen Bahn AG waren maßgebende Voraussetzung für den reibungslosen Ablauf der Ausgrabung geotextiler Filtermaterialien. Auch Herrn Dipl.-Ing. (FH) Chilian wünsche ich für die Zeit seines Ruhestandes alles Gute.

Innerhalb des AG Geotechnik der MFPA Weimar ist es mir ein Anliegen, neben Herrn Professor Dr.-Ing. Weiss, Frau Dipl.-Ing. Siegmund für die wertvolle Unterstützung während aller Phasen meiner Arbeit zu danken.

Die Bearbeitung der umfangreichen begleitenden bodenmechanischen Laboruntersuchungen wurde von Frau Dipl.-Ing. (FH) Tscheschlok trotz mehrfachen Erreichens der Kapazitätsgrenzen im Ablauf des Laboralltages berücksichtigt und durch das Laborpersonal, Herrn Gollhardt und Herrn Klimitsch, stets zuverlässig vorgenommen.

Für die fachliche Beratung und Unterstützung zu Fragen der rechnergesteuerten Datenerfassung und -auswertung bedanke ich mich bei Frau Dipl.-Math. Braune und Herrn Winges.

Herrn cand. ing. Elste bin ich für die außerhalb des Studienbetriebes angefertigten Bilddokumentationen der experimentellen Untersuchungen zu großem Dank verpflichtet. Seine in Zusammenarbeit mit Herrn cand. ing. Dettmann erstellte Studienarbeit lieferte wichtige Erkenntnisse zu einem Teilbereich der Problemstellung. Gleiches gilt für die von Herrn Dipl.-Ing. Grap bearbeitete Diplomaufgabenstellung zur Ausgrabung geosynthetischer Filterelemente.

Schließlich bin ich allen denen zu Dank verpflichtet, die mich in diesen Jahren ertragen und dabei so akzeptiert haben, wie es manchmal nicht anders möglich war.

D. V.

Kurzreferat

Maßgebende Voraussetzungen, das durch Geokunststoffe in der Geotechnik, dem Wasser- und Deponiebau etc. verfügbare Potential für Bauwerke auszuschöpfen, sind Belange und Sachverhalte, die unter der Bezeichnung des sogenannten „Geokunststoffgerechten Planens, Konstruierens und Bauens“ zusammengefaßt werden.

In der vorliegenden Arbeit werden, aufbauend auf einem zielgerichteten wissenschaftlichen Untersuchungsprogramm zur Funktion des Filterns, geokunststoffspezifische Phänomene der Kontaktsituation zwischen mineralischen Basiserdstoffen und geosynthetischen Filterelementen dokumentiert und im Hinblick auf ihre praktische Relevanz bewertet. Vorgenannte Phänomene werden unter dem Begriff des „Intimate Contact“ -vollflächiger Kontakt- in der Fachwelt diskutiert und als eine mögliche Ursache für das Versagen von Filtersystemen mit Geotextilien verantwortlich gemacht.

Durch die theoretische und praktische Modellierung von unter in-situ Bedingungen möglichen Grenzfällen unterschiedlicher Kontaktsituationen wird erstmalig eine Quantifizierung der Auswirkungen von Hohlräumen in der Grenzfläche Basiserdstoff/Geotextil für laminare Durchströmungsbedingungen vorgenommen.

Zur Durchführung großmaßstäblicher experimenteller Untersuchungen des Phänomens Intimate Contact und den Auswirkungen von Hohlräumen in der Grenzfläche auf die Funktionsweise dieser Filterkonstruktionen, wurde eine auf spezielle Belange geotextiler Filter ausgerichtete Versuchsanlage, „Weimarer Zelle“, vom Verfasser entwickelt. Die Analyse der Ergebnisse dieses Teiles der Untersuchungen im Modell der Durchströmungswiderstände weist für Abweichungen von der Bemessungsvorgabe des Intimate Contact eine Reduzierung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Filtersystemen aus. Diese tritt, in Abhängigkeit von der Präsenz werkstoffspezifischer Durchströmungswiderstände, unterschiedlich ausgeprägt durch den Prozeß der Scheinbaren Kolmation zu Tage.

Vorgenannte werkstoffspezifische Durchströmungswiderstände sind Gegenstand weiterer Untersuchungen, die als Ursache des unterschiedlichen Wasserdurchlässigkeitsverhaltens von Geotextilien unter sonst gleichen Bedingungen das Zusammenwirken von für Kunststoffe charakteristischen Benetzungswiderständen und der Beschaffenheit der Oberflächenstruktur der Vliesstoffe hervorheben.

Die Übertragbarkeit der in den Großversuchen simulierten Randbedingungen auf reale Verhältnisse wird durch einen Vergleich mit im Rahmen von Ausgrabungen geosynthetischer Filterelemente angetroffenen Situationen nachgewiesen.

Im Ergebnis der übergreifenden Analyse werden zur Berücksichtigung der sich aus praktischer Sicht zumeist zwangsläufig einstellenden Abweichungen von der Bemessungsvorgabe des Intimate Contact Teilsicherheitsbeiwerte angegeben, die eine den Verhältnissen in-situ und dem unterschiedlichen Wasserdurchlässigkeitsverhalten von Geotextilien deutlich näherstehende Formulierung von Randbedingungen konventioneller Bemessungsalgorithmen gestatten. Die angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte werden durch Empfehlungen für die Entwurfsphase dieser Filterkonstruktionen hinterlegt.

Abstract

Important prerequisites to turn geosynthetics to profit in constructions of geotechnical and hydraulic engineering or dump technology are related to aspects which meet the demands of these materials while planning, designing and building.

Based on a goal-directed research programm concerning geotextile filters, this Phd thesis deal with the demand and the problems to guarantee Intimate Contact between basis-mineral-soils and geosynthetic filter elements as well as the consequences for the effectiveness in case of cavities. Sharing of information from the excavation of geotextile filters the presence of cavities during installation is said to be one reason for the failure of several systems.

A modified theoretical and experimental modelling to investigate geotextile filters' performance is presented. This modelling allows to quantify the consequences of cavities in the interface basis-mineral-soil / geosynthetic filter element for serviceability under laminar flow conditions.

To analyse the performance of filter-systems with geosynthetics in case of different limit-states of contact a large-scale testing equipment has been developed. Using the modified theoretical model of flow resistances to evaluate experimental data, inadequate conditions of contact lead to a decrease of hydraulic conductivity, the so called Apparent Colmation.

The transferability of the large-scale laboratory tests on to site conditions is established with the results from geotextile excavations in filter and drainage applications.

Further experimental studies on specific material properties indicate an influence of water penetration resistance and surface roughness on geotextiles' hydraulic conductivity in common.

As a rule deviations from the standard of Intimate Contact under in-situ conditions appear inevitably. To evaluate the consequences of Apparent Colmation partial safety factors are now available for use in conjunction with common design methods to guarantee adequate permeability of geotextile filters under laminar flow conditions. The partial safety factors are completed with recommendations for a more sufficient filter design.

Meinen Eltern

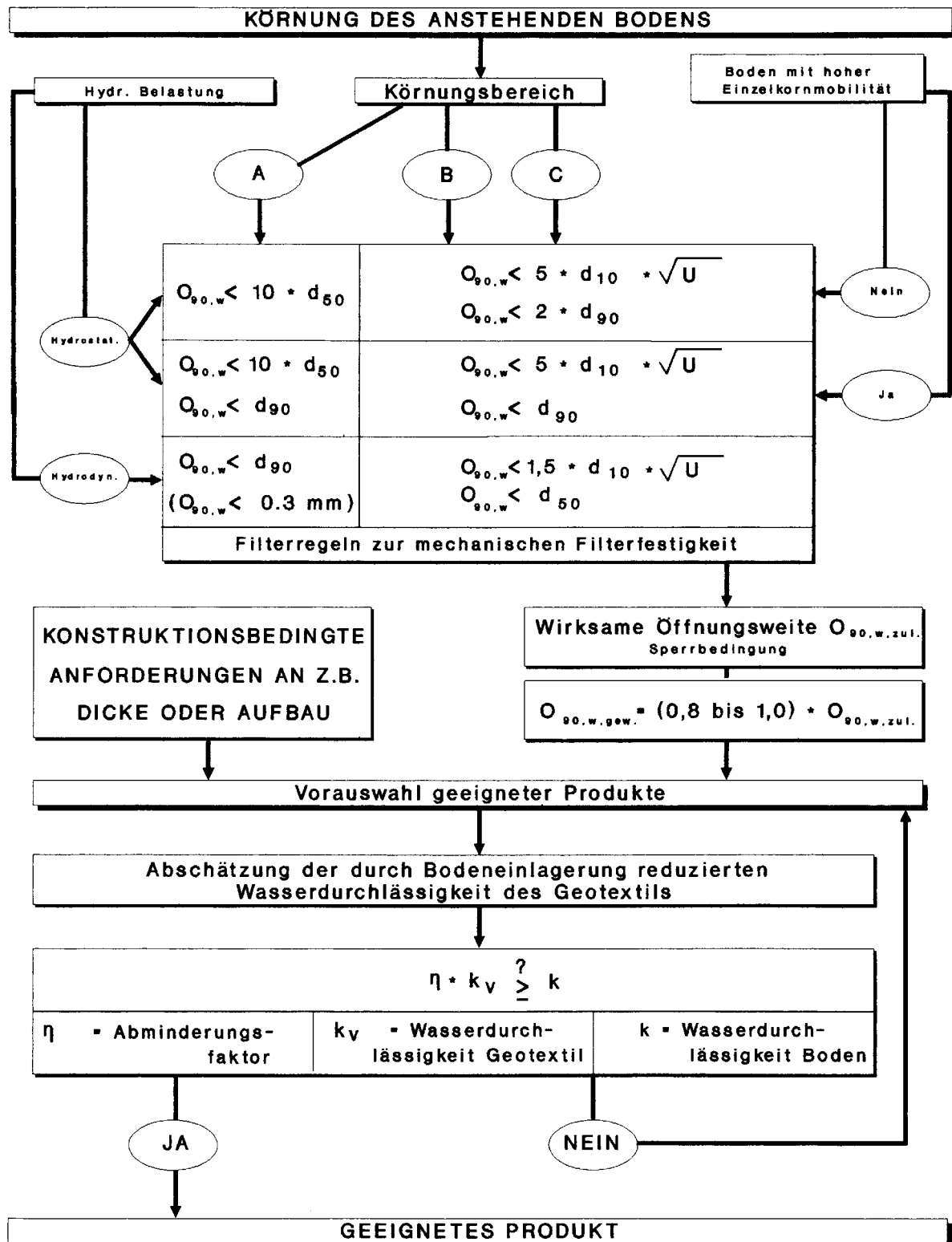


Abb. 2.16: Vereinfachtes Fließdiagramm zur Filterbemessung (Saathoff [80] in [129])



Bild a): Deckwerk A nach 7 Monaten



Bild b): Deckwerk A nach 2 Jahren



Bild c): Deckwerk B nach 7 Monaten



Bild d): Deckwerk B nach 2 Jahren



Bild e): Deckwerk C nach 7 Monaten



Bild f): Deckwerk C nach 2 Jahren

Abb. 2.18: Momentaufnahmen der Deckwerkskonstruktionen A - C (Heerten [44])

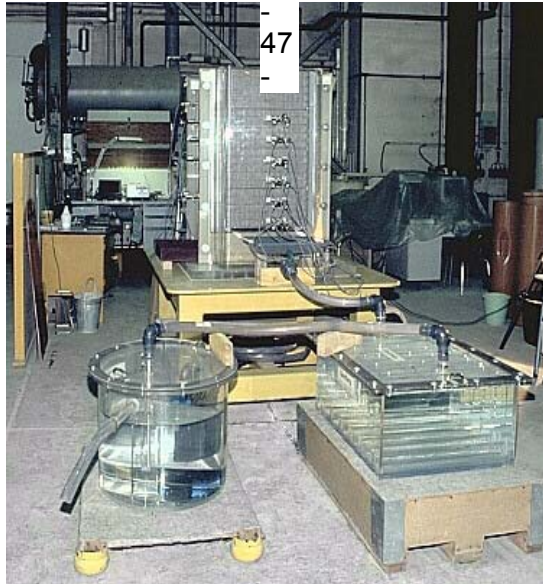


Bild a): Versuchsanlage „Weimarer Zelle“

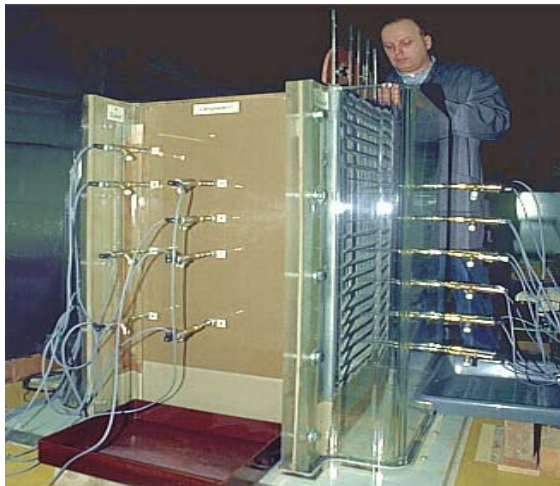


Bild b): Grundeinheit



Bild c): Detail Wasserkreislauf



Bild d): Rechnergesteuerte Datenerfassung mit Data-Logger und PC

Abb 4.5: Versuchsanlage „Weimarer Zelle“




Bild a): Spannungsfreier Einbau
Bild d): Momentaufnahme vor dem Entfernen der Distanzkonstruktion des geosynth. Prüflings



Bild b): Justieren der Distanzkon-
Bild e): Vollflächiger Hohlraum in der Grenzfläche struktion und Piezometer Basiserdstoff / geosynthetischer Filter



Parameter/Kennzeichnung
Aufstauhöhe h
Ableitewirksame Fläche A_w
Versuchsdauer t
Wasserableite- kennzeichnung
A_w 
Anzahl Einzelversuche

Tab. 4.2:
 Ergebnisüber-
 sicht zum
 Benetzungsv-
 erhalten der
 geotextilen
 Filtermateriali-
 en HB 1-3,
 NP 1-3

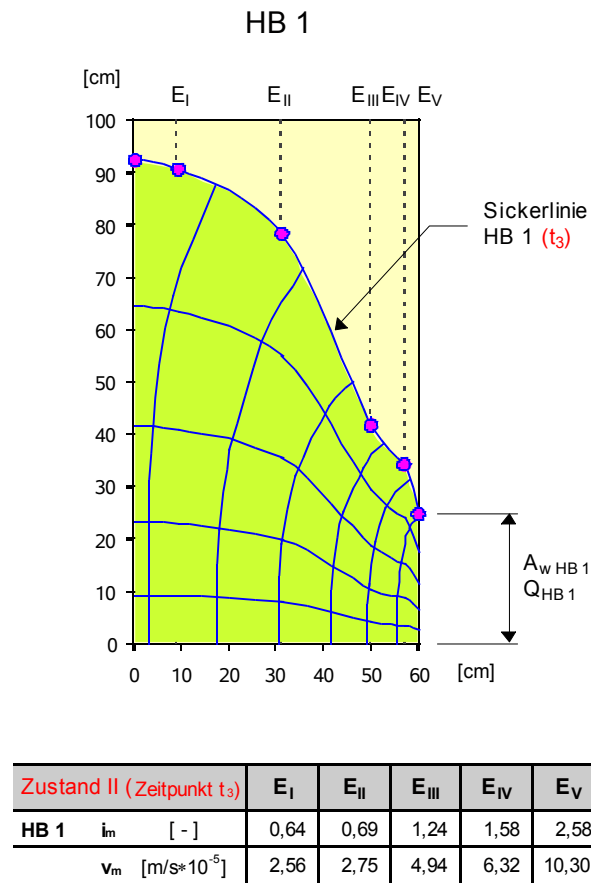


Bild a)

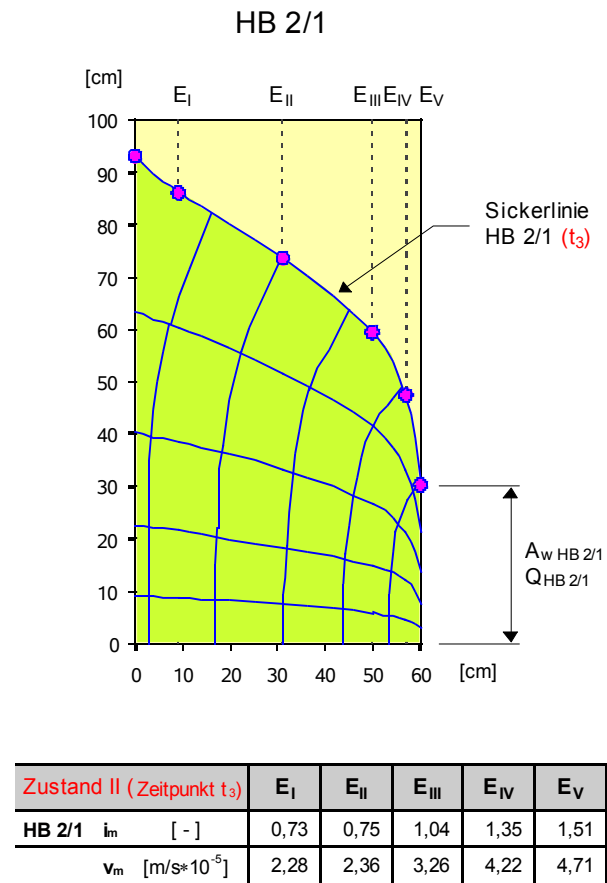


Bild b)

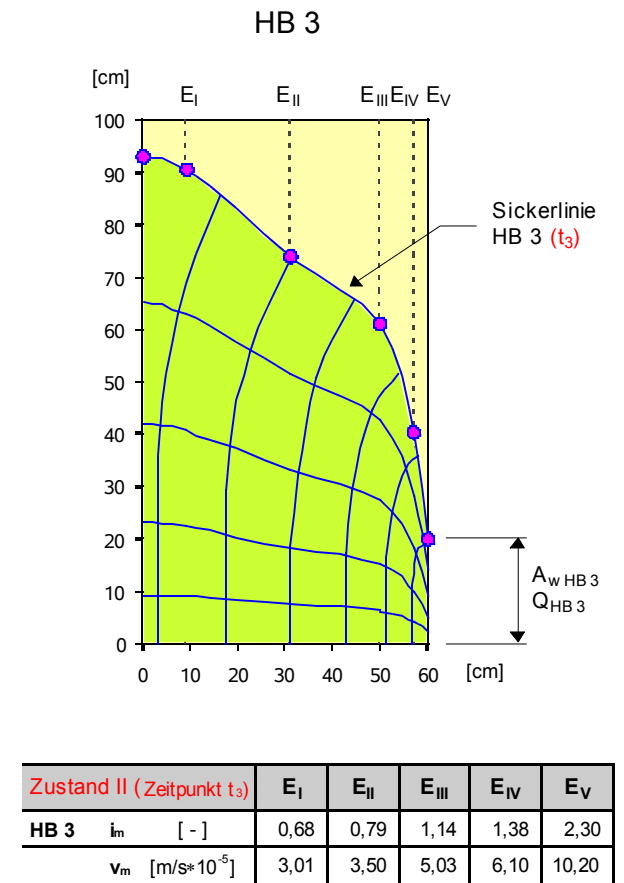
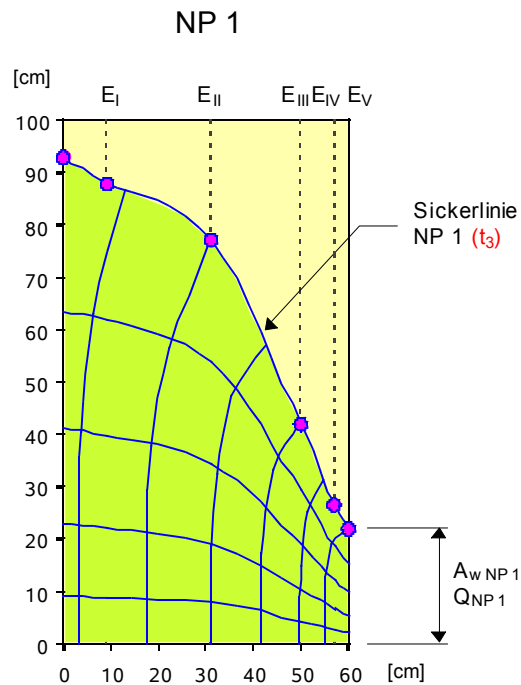


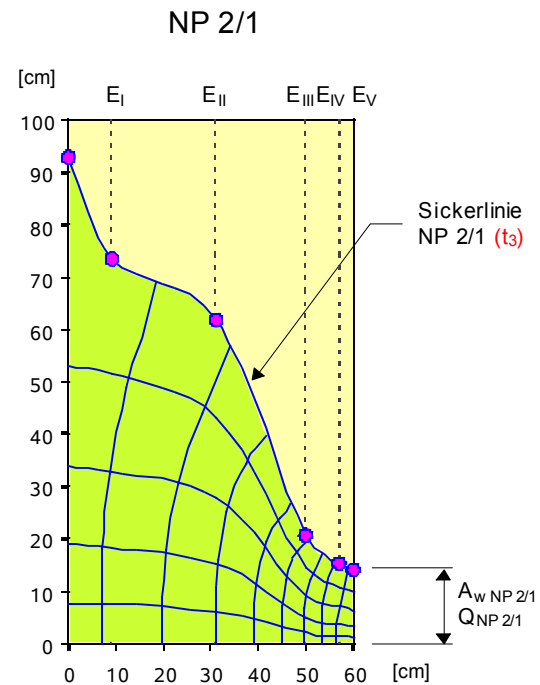
Bild c)

Abb. 5.1 a: Strömungs- und Potentialliniennetze der Großversuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt
-Grenzfall 2- Zustand II, Zeitpunkt t_3 , Prüflinge HB 1 bis HB 3



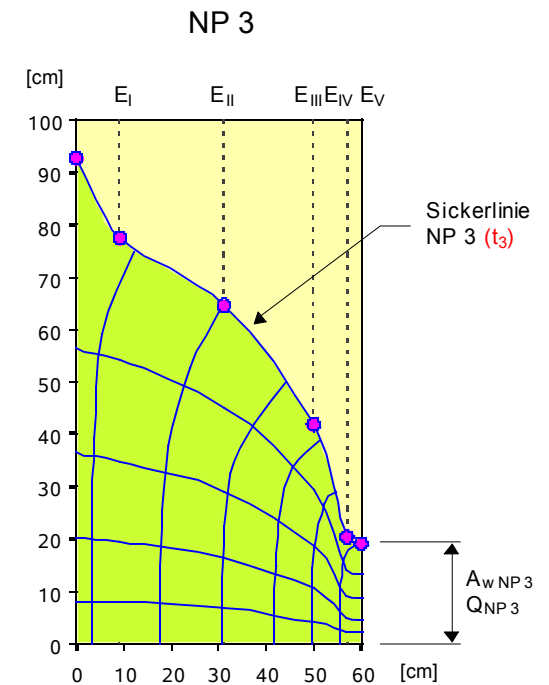
Zustand II (Zeitpunkt t_3)		E_I	E_{II}	E_{III}	E_{IV}	E_V
NP 1	i_m [-]	0,72	0,80	1,26	2,44	2,44
	v_m [m/s* 10^{-5}]	3,15	3,49	5,52	10,70	10,70

Bild d)



Zustand II (Zeitpunkt t_3)		E_I	E_{II}	E_{III}	E_{IV}	E_V
NP 2/1	i_m [-]	0,62	0,75	1,78	2,77	3,20
	v_m [m/s* 10^{-5}]	2,25	2,74	6,50	10,10	11,70

Bild e)

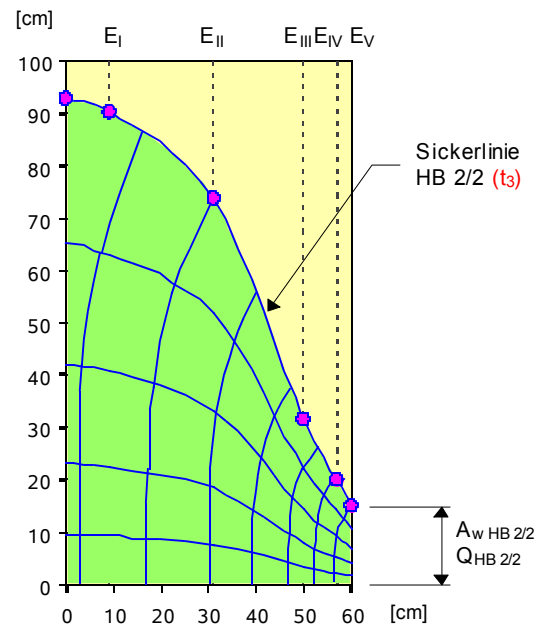


Zustand II (Zeitpunkt t_3)		E_I	E_{II}	E_{III}	E_{IV}	E_V
NP 3	i_m [-]	0,72	0,80	1,27	1,48	2,63
	v_m [m/s* 10^{-5}]	2,94	3,29	5,22	6,05	10,80

Bild f)

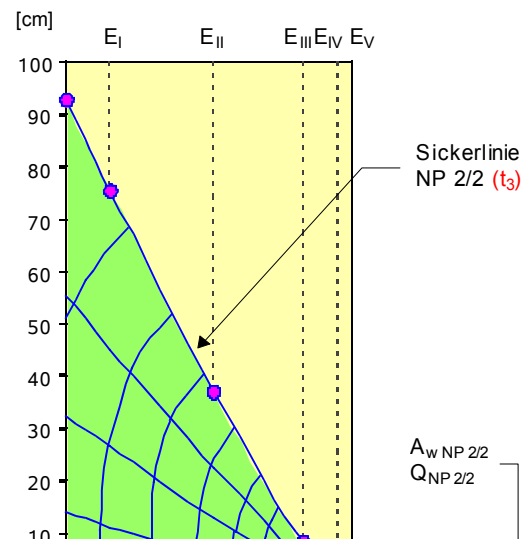
Abb. 5.1 b: Strömungs- und Potentialliniennetze der Großversuche mit hydraulisch eingestelltem Kontakt -Grenzfall 2- Zustand II, Zeitpunkt t_3 , Prüflinge NP 1 bis NP 3

HB 2/2

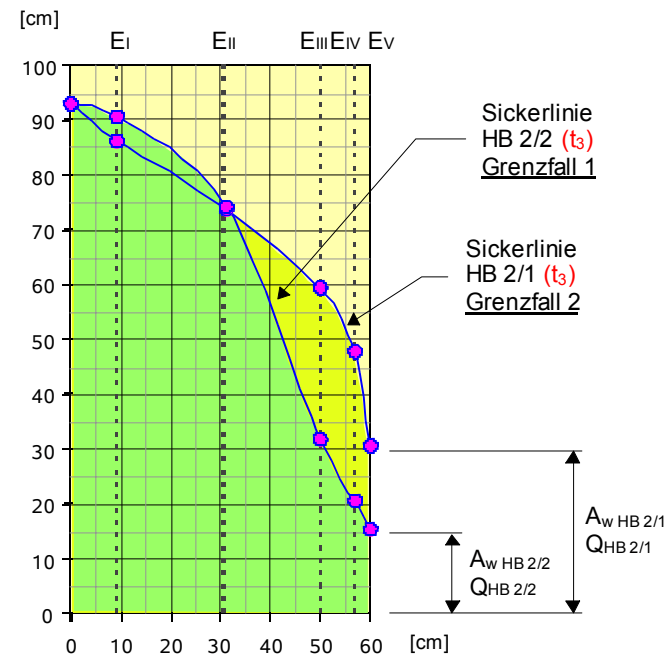


Zustand II (Zeitpunkt t_3)		E_I	E_{II}	E_{III}	E_{IV}	E_V
HB 2/1	i_m [-]	0,64	0,73	1,67	2,11	3,21
	v_m [m/s*10 ⁻⁵]	2,64	2,98	6,84	8,66	13,10

NP 2/2

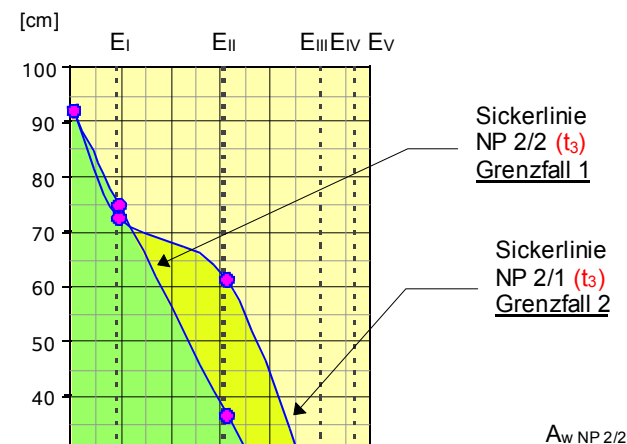


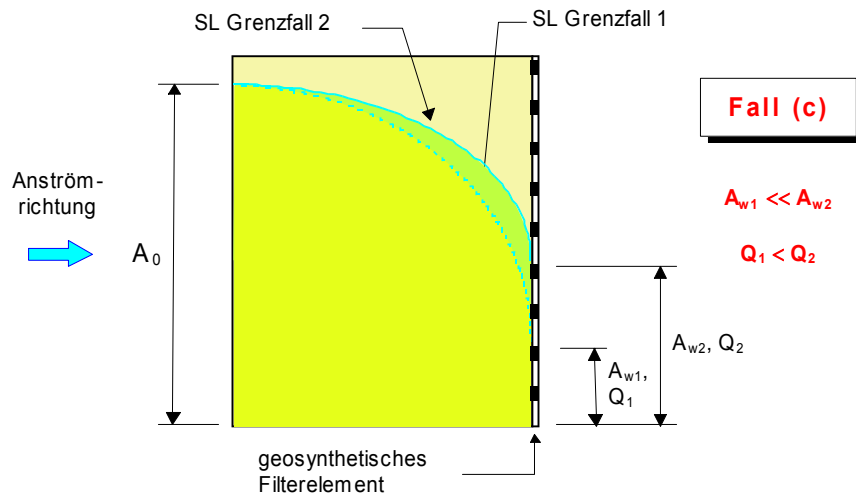
HB 2



Zustand II (Zeitpunkt t_3)			E_I	E_{II}	E_{III}	E_{IV}	E_V
HB 2/1	i_m	[-]	0,73	0,75	1,04	1,35	1,51
	v_m	[m/s*10 ⁻⁵]	2,28	2,36	3,26	4,22	4,71
HB 2/2	i_m	[-]	0,64	0,73	1,67	2,11	3,21
	v_m	[m/s*10 ⁻⁵]	2,64	2,98	6,84	8,66	13,10

NP 2





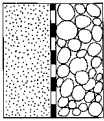
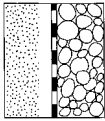
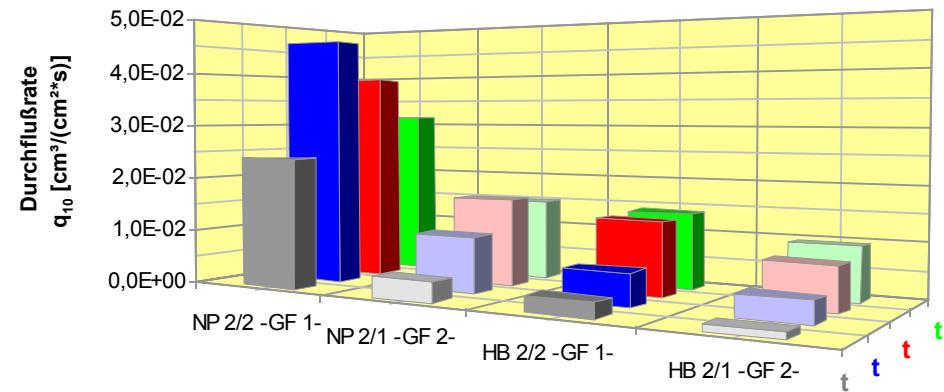
	Grenzfall 1		Grenzfall 2	
				
Prüfling	NP 2/2	HB 2/2	NP 2/1	HB 2/1
$A_w(t_3)$ [cm ²]	319	870	812	1740
$Q_{10}(t_3)$ [cm ³ /s]	12,1	11,7	13,1	13,8

Abb. 5.6: Zuordnung des Kontaktverhaltens von Filtersystemen mit Geotextilien auf Grundlage einer Grenzfallbetrachtung



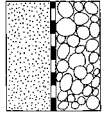
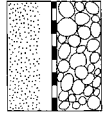
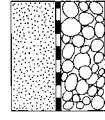
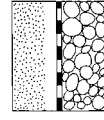
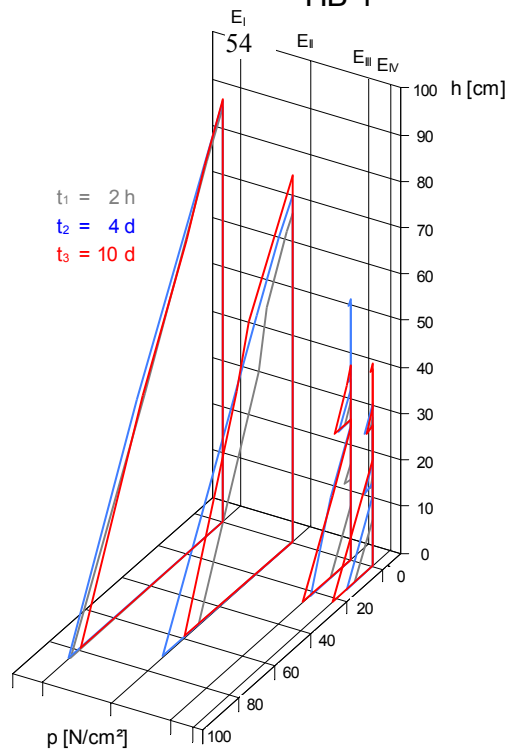
Prüfling		NP 2		HB 2	
Zeitpunkt	Durchflußrate	Grenzfall 1  NP 2/2 -GF 1-	Grenzfall 2  NP 2/1 -GF 2-	Grenzfall 1  HB 2/2 -GF 1-	Grenzfall 2  HB 2/1 -GF 2-
t_1	q_{10} [cm ³ /(cm ² *s)]	2,4E-02	3,7E-03	2,8E-03	1,1E-03
	$q_{10 \text{ GF 1}} : q_{10 \text{ GF 2}}$ [-]	1	0,15	1	0,38
t_2	q_{10} [cm ³ /(cm ² *s)]	4,6E-02	1,0E-02	6,0E-03	4,0E-03
	$q_{10 \text{ GF 1}} : q_{10 \text{ GF 2}}$ [-]	1	0,22	1	0,67
t_3	q_{10} [cm ³ /(cm ² *s)]	3,9E-02	1,6E-02	1,3E-02	7,9E-03
	$q_{10 \text{ GF 1}} : q_{10 \text{ GF 2}}$ [-]	1	0,42	1	0,59
t_4	q_{10} [cm ³ /(cm ² *s)]	3,1E-02	1,5E-02	1,4E-02	9,8E-03
	$q_{10 \text{ GF 1}} : q_{10 \text{ GF 2}}$ [-]	1	0,47	1	0,70

Abb. 5.7: Gegenüberstellung der Durchflußraten der Prüflinge NP 2 und HB 2 für Kontaktbedingungen der Grenzfälle 1 und 2

HB 1



HB 2/1

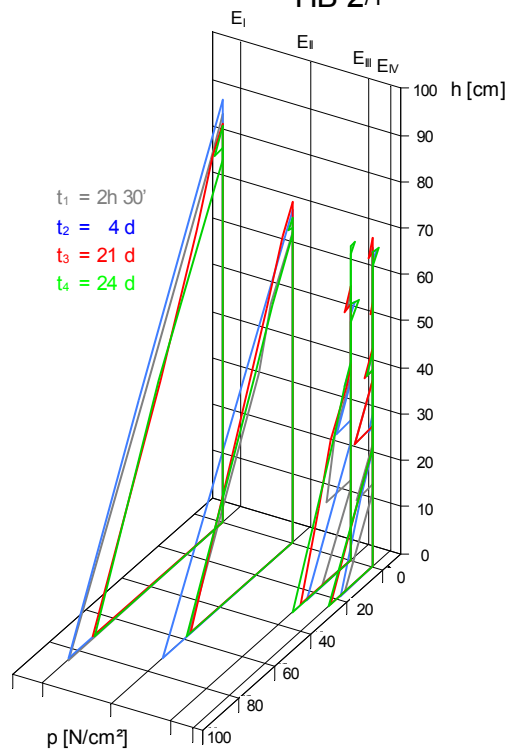
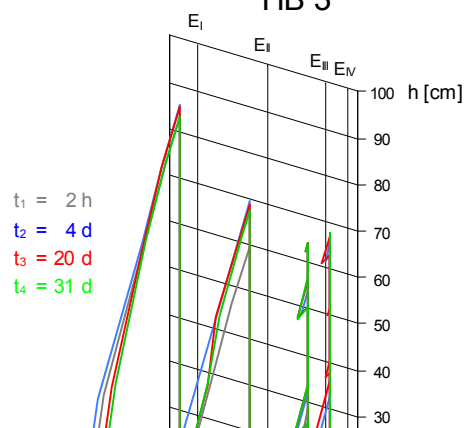


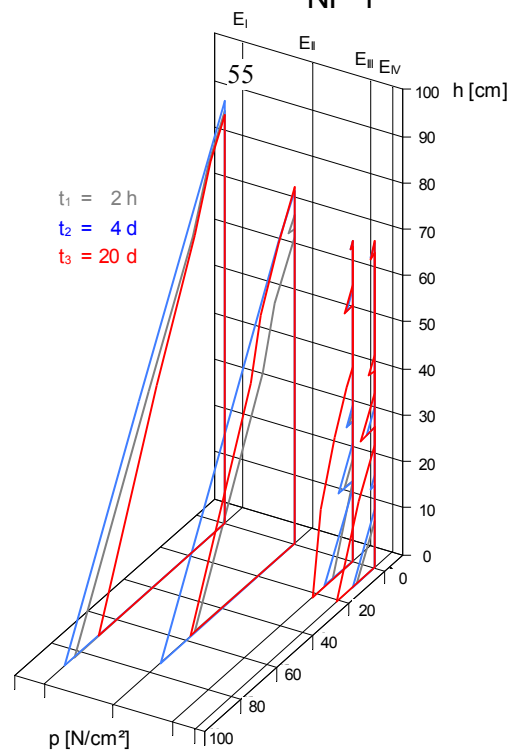
Bild a)

Bild b)

HB 3



NP 1



NP 2/1

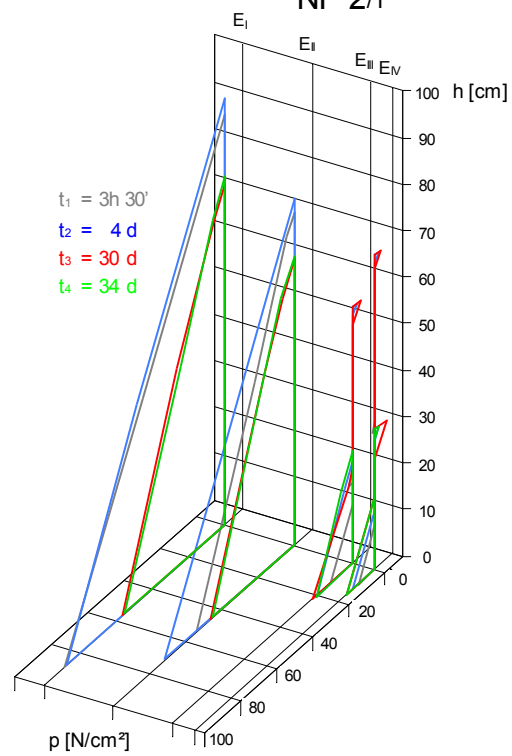


Bild d)

Bild e)

NP 3

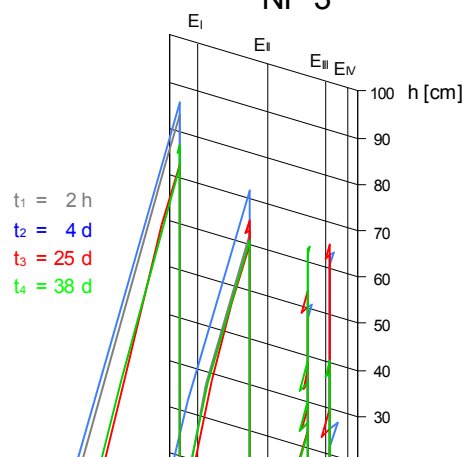


Abb. 4.10 b: Wasserdruckprofile in den Meßebenen E_I bis E_{IV} ; Bilder d) - f)

HB 1

E_i E_{ii} E_{iv} E_i E_v

HB 2/1

E_i E_{ii} E_{iv} E_i E_v

HB

E_i E_v

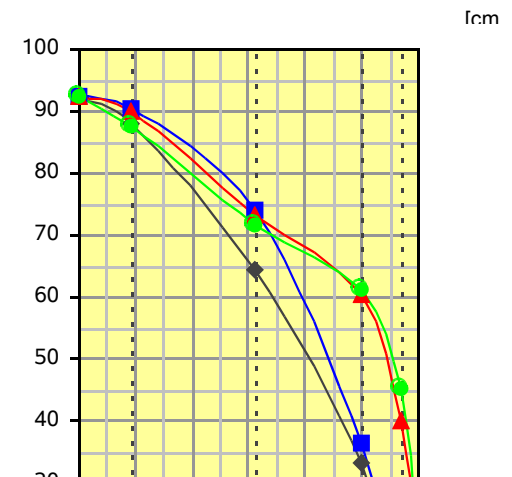
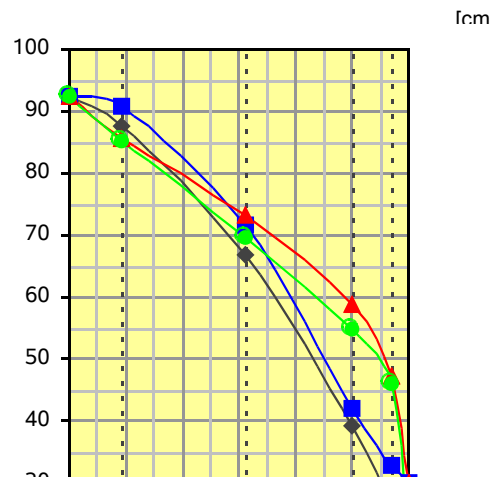
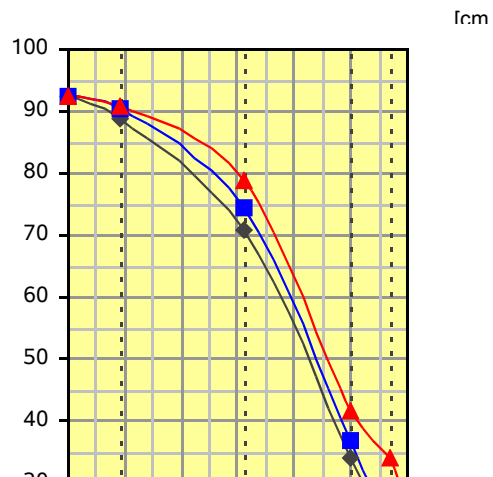
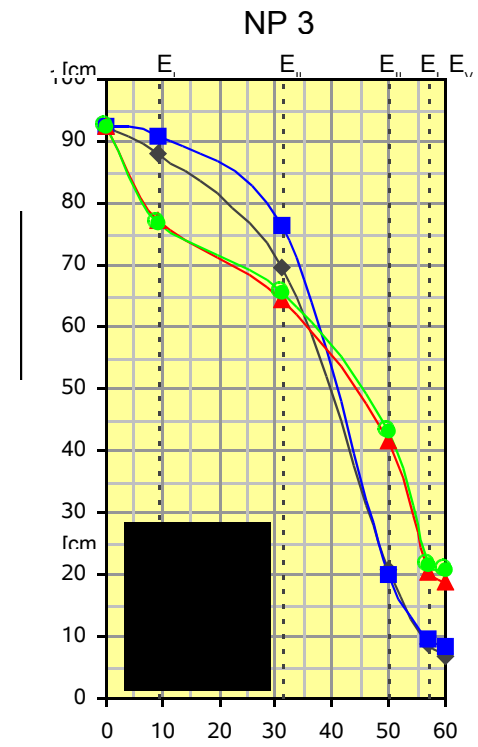
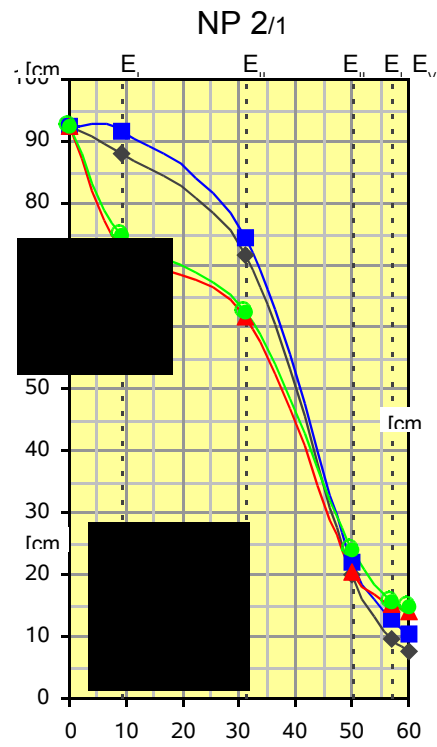
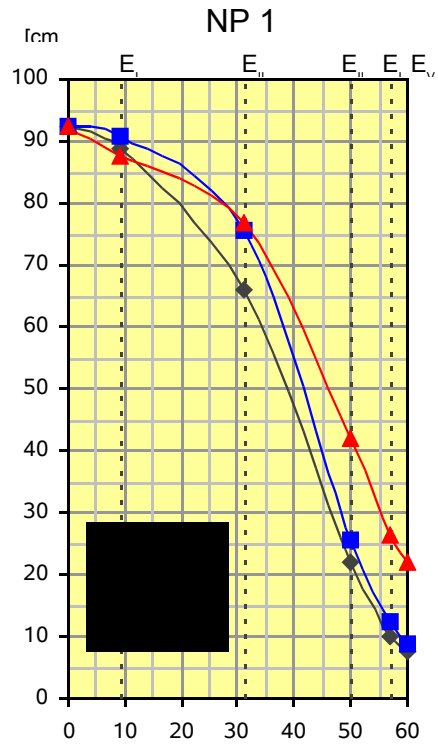


Bild a)

Bild b)

Bild c)

Abb. 4.12 a: Entwicklung der Lage der Sickerlinie während signifikanter Versuchsphasen -hydraulisch eingestellter Kontakt-; Bilder a) - c)

Bild d)

Bild e)

Bild f)

Abb. 4.12 b: Entwicklung der Lage der Sickerlinie während signifikanter Versuchsphasen -hydraulisch eingestellter Kontakt-; Bilder d) - f)



Bild a): Tiefenentwässerung an Entnahmestelle 1; Bahnlinie Berlin-Dresden



Bild b): Detail Sickerwand (Wufilon P 30) und Rohrfilter (Kridee 100)

Abb. 4.28: Freilegung Geotextilien
Entnahmestelle 1; Versuchsstrecke
Berlin Dresden



Bild a): Aufschluß Entnahmestelle 2;
Tiefenentwässerung Bhf Peitz-Ost

Abb. 4.29: Freilegung der
Tiefenentwässerung an
Entnahmestelle 2; Bahnhof Peitz-Ost

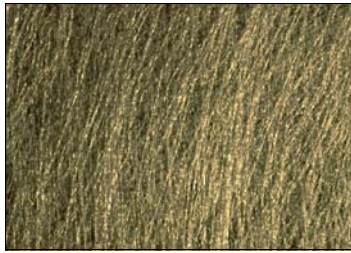


Bild a): Prüfling HB 1



Bild d): Prüfling NP 1

Abb. 5.10:
Detailaufnahmen zur
Oberflächenstruktur der

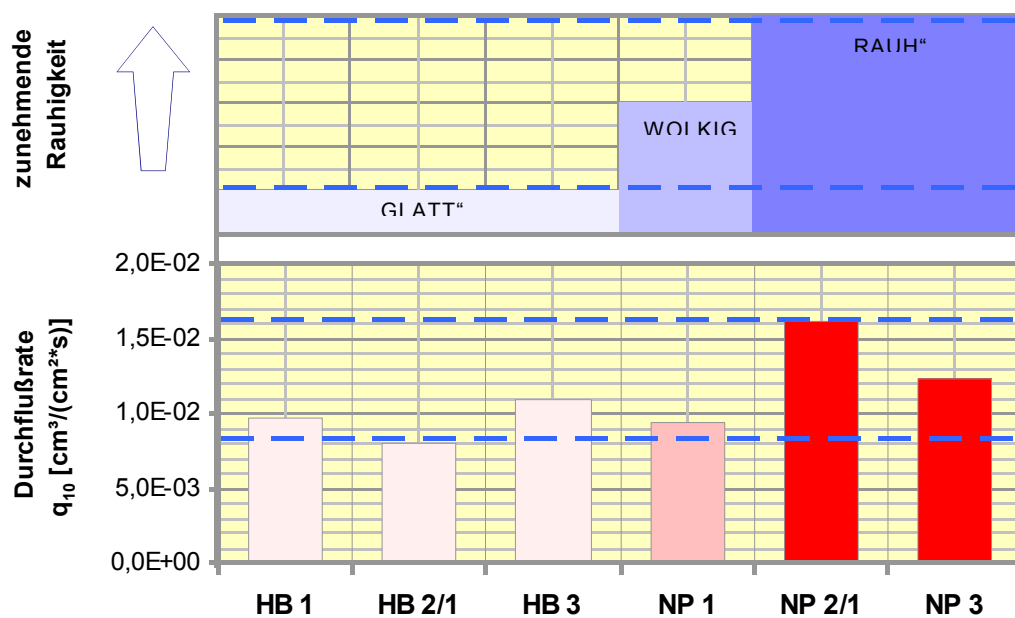


Abb. 5.11: Zusammenhang zwischen der Durchflußrate q_{10} des Grenzfalles 2 und der Oberflächenstruktur der geosynthetischen Filterelemente

Prüflinge HB 1-3 und NP 1-3